



SAVONIA

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ONTELOLAATTOJEN KAPASITEETTIILASKENTA

TEKIJÄ: Erik Kyllönen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Erik Kyllönen	
Työn nimi Ontelolaattojen kapasiteettilaskenta	
Päiväys 7.5.2018	Sivumäärä/Liitteet 51/9
Ohjaaja(t) Rakennetekniikan yliopettaja, TkT, Arto Puurula ja rakennetekniikan tuntiopettaja, insinööri yamk, Henri Humala	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Insinööritoimisto Kari Kolari Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli laskea murtorajatilan kapasiteetit 200 millimetriä korkealle ontelolaatalle, ja muodostaa laskelmista saaduista arvoista valintakäyrästä, joka helpottaisi suunnittelijoita valitsemaan oikeanlaisen ontelolaattatyypin suunnitteilla oelvaan kohteeseen. Lisäksi yksi opinnäytetyön tavoitteista oli tuottaa sellainen kokonaisuus, jossa on kaikki tarvittavat laskukaavat murtorajatilan taivutus- ja leikkauskapasiteetin laskemiseen, sekä muodostaa niistä sellainen kokonaisuus, jota voitaisiin tarvittaessa käyttää opetuksessa.</p> <p>Aluksi perehdyttiin lähdemateriaaleihin ja tarkasteliin tarkemmin tarvittavia laskentakaavoja, jotta niistä saataisiin kokonaisuus jota olisi helppo ymmärtää. Opinnäytetyöhön muokattiin lujabetonin 200 millimetriä korkeasta ontelolaatasta helpotettu poikkileikkaus laskuesimerkkiä varten. lisäksi helpotetulla poikkileikkauksella suoritettu kapasiteettilaskenta antaa tietoa mahdollisuudesta laskea ontelolaattojen kapasiteetteja tämän kaltaisella poikkileikkauksella. Opinnäytetyötä varten täytyi tehdä Excel-työkirja, joka laskee hankalimmat kohdat taivutus- ja leikkauskestävyydestä. Näiden kaavojen muodostamista Excel-työkirjaan on selostettu opinnäytetyössä. Opinnäytetyön poikkileikkauksen geometrisia suureita ja Lujabetonin poikkileikkauksen geometrisia suureita vertailtiin käytämällä Autocad-ohjelmaa. Murtorajatilan kapasiteettien arvoja verrattiin Cadeon-ohjelman arvoihin, jotta voitaisiin päätellä, kuinka laskut ovat onnistuneet. Lisäksi laskuesimerkissä on myös omaa pohdintaa laskujen onnistumisesta ja huomioita siitä, mitä tuli laskuesimerkkiä tehdessä.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin kattava kokonaisuus ontelolaatun taivutus- ja leikkauskapasiteetin laskennasta. Tämän lisäksi lasketuista kapaasiteeteista muodostettiin valintakäyrät 200 millimetriä korkeille ontelolaatoille betonin lujuusluokissa C40/50 ja C50/60.</p>	
Avainsanat Ontelolaatta, esijännitys	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Construction Engineering			
Author(s) Erik Kyllönen			
Title of Thesis Capacity calculation of hollow core slabs			
Date	7 may 2018	Pages/Appendices	51/9
Supervisor(s) Mr Arto Puurula, PhD, Principal lecturer and Mr Henri Humala, Meng, lecturer			
Client Organisation /Partners Engineering office Kari Kolari Oy			
<p>Abstract</p> <p>The main purpose of this final project was to calculate ultimate limit state capacities for a 200 millimeter high hollow core slab and to create a load carrying capacity graph from calculated results to facilitate choosing between different hollow core slab types for the building being designed. Another aim of the final project was to produce a unity which includes every formula of ultimate limit state capacity for calculating the bending and shear capacity in such a form that it could be used for educational purposes if necessary.</p> <p>First, the source material was studied and after that the required formulas were examined more closely so that they could be made into a totality which could be easy to understand. The cross section of a 200 millimeters high hollow core slab used by Lujabetoni was modified to be used as a calculation example. In addition, such an example also gives information about the possibility to calculate capacities of hollow core slabs with this type of cross section. An Excel workbook had to be made, which calculates the most difficult parts of bending and shear capacity calculations. The geometric characteristics of the hollow core slab section in the final project and the hollow core slab characteristics used by Lujabetoni were compared using Autocad program. Ultimate limit state capacities were compared to the values of Cadeon-programs, so that conclusions could be made from the calculations. In addition, the calculation example includes pondering of the success of the calculation and it includes remarks, which were made when making the calculation example.</p> <p>The result of the final project is a comprehensive totality of calculating the bending and shear capacity of hollow core slabs. Furthermore, load carrying capacity graphs for 200 millimeters high hollow core slabs in C40/50 and C50/60 concrete strength were made from the calculated capacities.</p>			
<p>Keywords hollow core slab, prestressed</p>			

ESIPUHE

Tämä opinnäytetyö tehtiin Insinööritoimisto Kari Kolari Oy:lle. Haluan kiittää Insinööritoimisto Kari Kolari Oy:n Ari Taskista, Kari Kolaria ja Ville Rautiota opinnäytetyössä pitkäjänteisestä neuvomisesta.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO (KORJAA)	6
2	TEORIA	7
2.1	Jännebetonirakenne	7
2.2	Ontelolaatat.....	8
2.3	Ontelolaattojen valmistusprosessi	11
3	ONTELOLAATAN POIKKILEIKKAUKSEN GEOMETRISET SUUREET	15
3.1	Pinta-ala.....	15
3.2	Painopiste	17
3.3	Jäyhyysmomentti	18
3.4	Poikkileikkauksen leveys kriittisessä pisteessä	20
3.5	Staattinen momentti	20
4	MATERIAALITIEDOT	21
4.1	Materiaalien varmuuskertoimet	22
5	TAIVUTUSKAPASITEETTI	23
6	LEIKKAUSKAPASITEETTI.....	27
7	EXCEL-TYÖKIRJA.....	35
7.1	Siivun pituus ja sijainti.....	35
7.2	Staattinen momentti	35
7.3	Betonin puristus.....	36
7.4	Puristusresultantti	38
7.5	Leikkauskestävyys.....	38
8	LASKUESIMERKKI.....	39
8.1	Poikkileikkaustiedot.....	40
8.2	Taivutuskapasiteetin laskenta	42
8.3	Leikkauskestävyyden laskenta	43
9	VALINTAKÄYRÄSTÖ	48
10	POHDINTA.....	50
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	51
11	LIITTEET	52

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni tarkoituksena on laskea ontelolaatan leikkaus- ja taivutuskapasiteetteja ja muodostaa valintakäyrästä, joka auttaisi suunnittelijoita valitsemaan oikeanlaisia ontelolaattoja käyttötarkoituksiinsa. Opinnäytetyöni tehdään Insinööritoimisto Kari Kolari Oy:lle. Opinnäytetyössäni käytetään Lujabetonin ontelolaattojen dimensioita, sekä punosmääriä ja ryhmityksiä. Valintakäyrästä ja laskelmat tehdään 200 millimetriä korkealle ontelolaatalle. Kapasiteettitaulukoita on tehty aikaisemmin jo tästä ontelolaattatyypistä, mutta opinnäytetyössäni on tarkoitus päivittää valintakäyrästä eurokoodien laskukaavojen mukaisiksi.

Ontelolaattojen kapasiteettien esimerkkilaskuissa tullaan käyttämään mahdollisimman yksinkertaisia laskenta-arvoja, kuten paloluokkaa REI60, rasitusluokka XC1, sekä käyttöikää 50 vuotta. Betoni, jota laskuissa käytetään, on C40/50. Lisäksi ontelolaattojen tuki on taipumaton ja laskuissa käytetään ontelolaatan minimitukipituuksia.

2 TEORIA

2.1 Jännebetonirakenne

Jännebetonirakenne on jännitetty rakenne, johon on keinotekoisesti saatu puristusjännitystila, jonka takia rakenne pysyy suurimmaksi osin puristettuna, halkeilemattomana ja taipumattomana ulkopuolisten kuormien vaikutuksen alaisena. Edellä mainittu puristusjännitystila on saatu aikaiseksi jännittämällä betonin sisällä olevia suuren lujuuden omaavia teräksiä, eli jänneteräksiä. (Paasikallio, Mikkola ja Nyman 1989, 2.)

Betonirakenteiden jännittämiseen käytetään käytännössä kahta eri tapaa, jotka ovat esijännittäminen ja jälkijännittäminen. Esijännittämisessä jänneteräksset jännitetään kiinteää alustaa, tai lujia muotteja vasten, jonka jälkeen betoni valetaan jänneterästen päälle. Betonin kovetuttua tiettyyn lujuuteen jänneteräksset katkaistaan alustastaan, jolloin jänneterästen esijännittämisellä saatu voima siirtyy tartunnan avulla betoniin. Jälkijännittämisessä jänneteräksset voivat olla tartunnattomia tai ne sijoitetaan suojaputkiin, jonka jälkeen suoritetaan betonin valu, ja betonin kovetuttua jänneteräksset jännitetään valettuun rakenteeseen tukeutuvien ankkureiden avulla. Jännittämisen jälkeen suojaputket injektoidaan sementtilaastilla koko matkalta, näin ollen syntyy tartunta jänteen koko pituudelle. (Paasikallio, Mikkola ja Nyman 1989, 2.)

Jännitysmateriaalit koostuvat aktiivisesta jännittäjästä, jänneteräksistä mahdollisten lisälaitteiden kanssa ja passiivisesta jännitettävästä, betonista. Jänneteräksinä käytetään jänneteräslankoja, jännetankoja, jännepunoksia, jännevaijereita ja jännenippuja. Ontelolaatoissa käytetään 7-lankaisia jännepunoksia, jotka ovat poikkileikkauksiltaan 12,5, tai 9,3 millimetriä. Jänniteräksiä valmistetaan eri lujuusluokissa, esimerkiksi St 1600/1800 ja 1630/1860, jossa ensimmäinen luku ilmaisee jänneteräksen myötölujuuden ja jälkimmäinen murtolujuuden. (Paasikallio, Mikkola ja Nyman 1989, 3.)



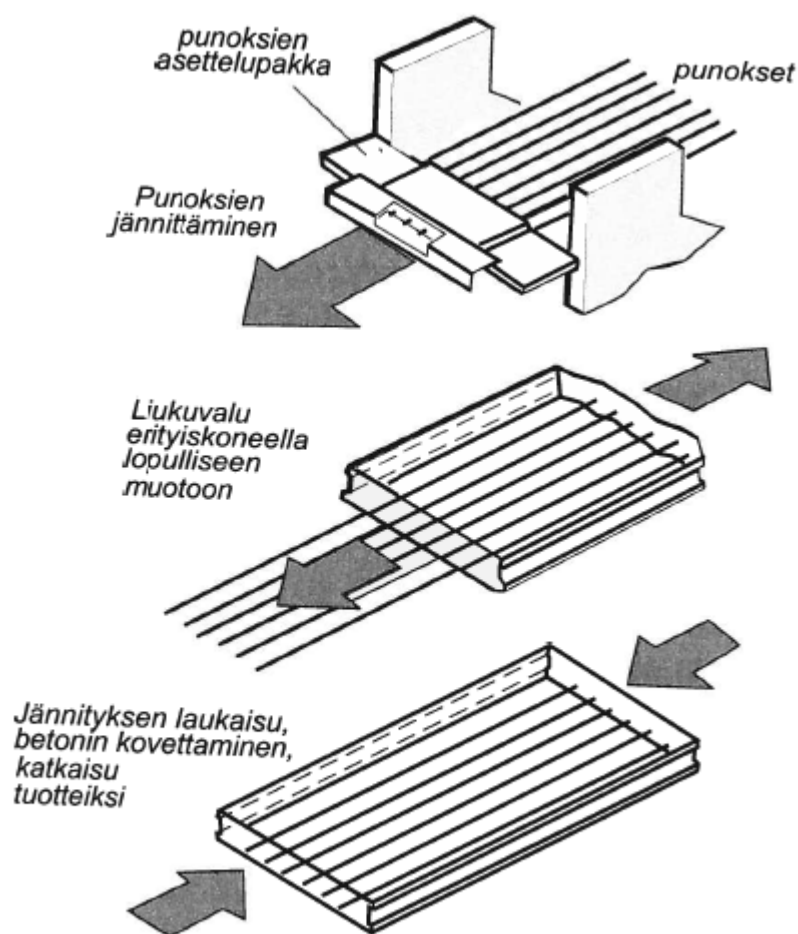
Kuva 1. 7-lankainen jännepunos. (Kyllönen 2018-01-05).

Jännepunokset valmistetaan kylmävedetyistä langoista, jotka punotaan samaan suuntaan. Punottavien lankojen lukumäärä vaihtelee 2-27 lankaan, joista yleisimmän ollessa 7-lankaiset punokset, jossa on keskellä suora ydinlanka ja ympärillä 6 punottua kehälankaa. (Suomen Betoniyhdistys 2005, 68.)

2.2 Ontelolaatat

Ontelolaatat ovat käytetyin elementtilaattatyyppi, jota käytetään betonirunkoisissa rakennuksissa. Käyttökohteita ovat asuin-, liike- ja teollisuusrakennusten ala-, väli ja yläpohjissa, mutta niitä voidaan myös käyttää seinärakenteinakin. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 50-56.)

Ontelolaatat ovat esijännittettyjä teräsbetonielementtejä, jotka ovat keveitä laatan pituussuunnassa kulkevien onteloiden ansiosta. Ontelolaattojen valmistuksessa käytetään betonia, joka on lujuusluokaltaan vähintään C40, mutta enintään C70. Ontelolaattoja valmistettaessa käytetään liukuvalua, jossa käytetään maakosteaa massaa, joka valetaan pitkien teräksisten valupetien päälle. Massan ollessa maakosteata ei erillisä muottilaitoja tarvita, koska valukoneen muotoilemana ja tiivistämänä laatta säilyttää alustalla muotonsa. Kuvassa 2 on esitettyinä ontelolaattojen valmistusprosessin periaate. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 50-56.)



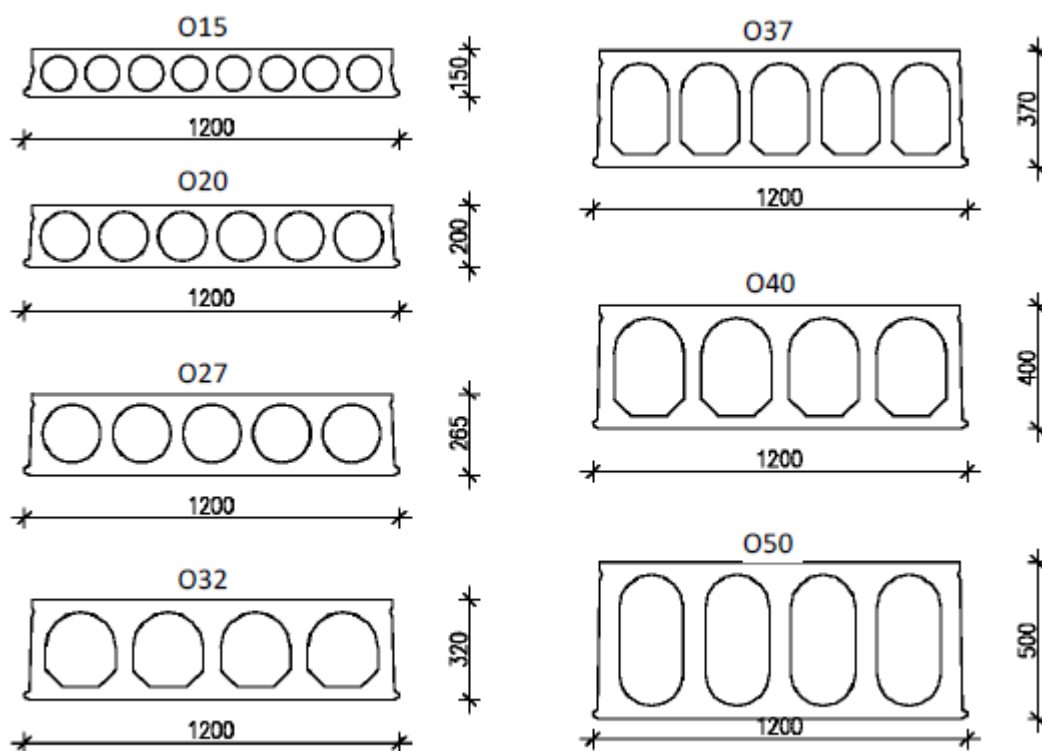
Kuva 2. Ontelolaatan valmistusprosessin periaate. (Suomen betoniyhdistys 2005, 686.)

Ontelolaatoissa olevien onteloiden dimensiot ja määrät vaihtelevat korkeuden mukaan. Ontelolaattojen valmistuspaksuuksia on 150, 200, 265, 320, 370, 400 ja 500 millimetriä, näistä kuitenkin harvinaisimman ollessa 150 millimetriä korkea. Ontelolaattojen vakioleveys on 1200mm, mutta niitä voidaan valmistaa myös kapeampina, jolloin ontelolaattoja täytyy sahata tähän tarkoitukseen käyvällä sahalla. Ontelolaattoja käyttämällä voidaan päästä jopa 20 metrin jänneväleihin. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 50-56.)

Palonkesto ontelolaatoissa on ilman erillistoimenpiteitä REI60, mutta ne voidaan suunnitella palonkestoaikaan REI90 tai REI120 nostamalla punosten suojaetäisyyttä laatan alapintaan. Pidempien palonkestovaatimusten, kuten REI180 tai REI240 saavuttamiseksi on ontelolaatoissa käytettävä punosten suojaetäisyyden nostamisen lisäksi myös alapuolista paloeristystä. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 50-56.)

Ontelolaattoja pystytään tekemään myös ulokkeina, esimerkiksi parvekkeneina tai erkkereinä. Näissä tapauksissa ontelolaatoissa käytetään yläpunoksia, mutta lyhyitä ulokkeita voidaan tehdä myös laattojen saumoihin, tai pintabetoniin asennettavilla raudoituksilla. Pintabetoniin sijoitettava lisärauditus on ankkuroitava laatastoon. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 50-56.)

Ontelolaatoista pystytään tekemään myös vinopäisinä, eristettyinä sekä tampattuina eli ”kylpyhuonelaattoina”. Vinopäisiä ontelolaattoja saadaan tehtyä ontelolaattatehtaalla käyttämällä samaa sahaa, kuin kavennuksia tehtäessä. Eristettyjä ontelolaattoja tehdään ontelolaattatehtaalla liimaamalla ontelolaattojen alapintaan lämmöneriste. Eristettyjä ontelolaattoja käytetään yleensä rakennusten alapohjissa, jolloin eristeen täytyy olla ulkoisten kuormitusten kestäviä, kuten esimerkiksi polystyreeniä. Kylpyhuonelaatat ovat tampattuja ontelolaattoja, joihin voidaan asentaa kylpyhuoneiden tekniikkaa, sekä tehdä pintavaluihin kallistuksia, jotta kallistukset saataisiin haluttuun korkeusasemaan. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 50-56.)



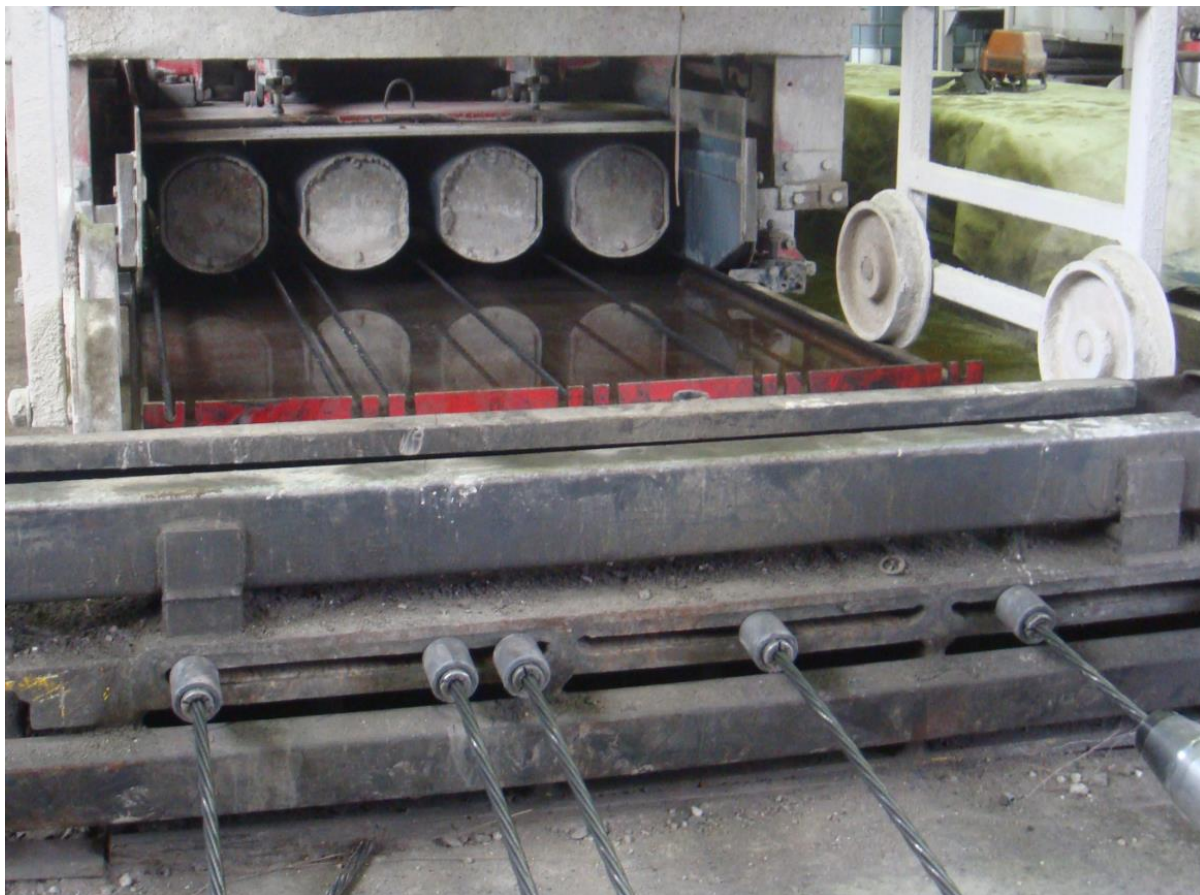
Kuva 3. Ontelolaattoja valmistettaessa käytetyt korkeudet ja vakioleveys. (Elementtisuunnittelu, Runkorakenteet 2010-03-10, 51.)

2.3 Ontelolaattojen valmistusprosessi

Tässä alakappaleessa on kuvattu ontelolaatan valmistusprosessia tarkemmin, sekä kuvien avulla, jotta se helpottaisi prosessin hahmottamista. Aluksi ontelolaatoista tehdään valuohjelmat, joissa määrätään millä punostuksella linja tehdään ja varustellaan tietyllä punosten asettelupakalla ja punokset jännitetään tämän jälkeen.



Kuva 4. Jännepunosten asettelupakka (Rautio 2011).



Kuva 5. Jännitetty ontelolaattalinja (Rautio 2011).

Kuvasta 5 oikeassa alakulmassa näkyy laite, jolla ontelolaatan punokset jännitetään oikeaan punosjännitykseen. Jännepunokset pidetään paikoillaan kuvissa näkyvillä lukkoilla. Lisäksi kuvassa näkyy ontelolaattojen valukone.

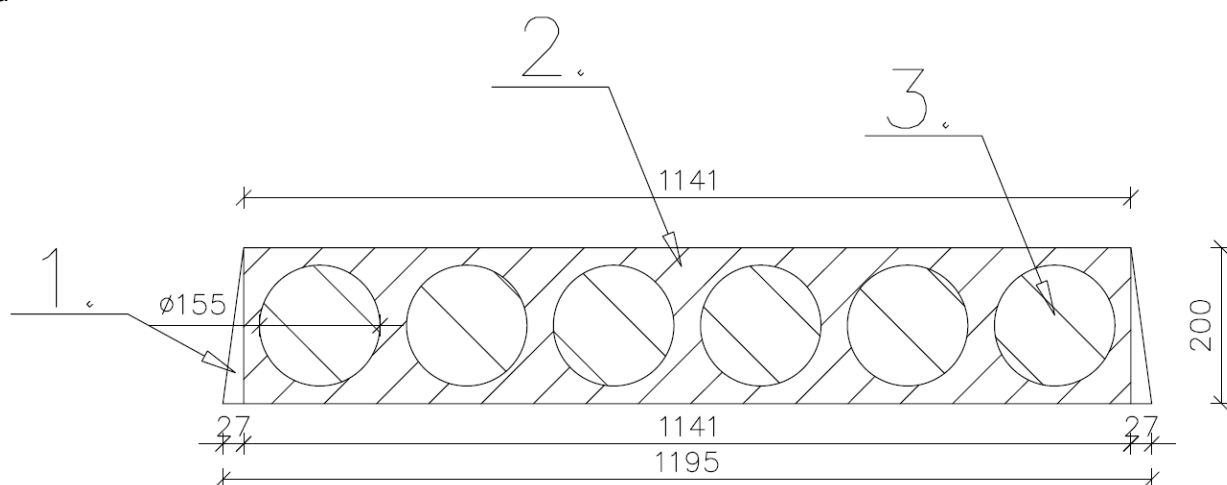


Ontelolaattojen annetaan varausten tekemisen jälkeen kovettua laukaisulujuuteen. Tämän jälkeen ontelolaattojen jännepunokset laukaistaan, eli ontelolaattojen jännepunokset katkaistaan kummastakin päästä ja ontelolaatat sahataan tiettyyn pituuteen. Ontelolaattojen sahaaminen aiheuttaa sen, että esijännittämisellä saatu voima siirtyy yksittäiseen ontelolaattaan.

3 ONTELOLAATAN POIKKILEIKKAUKSEN GEOMETRISET SUUREET

Ontelolaatan kapasiteettien laskennassa aloitetaan ensimmäiseksi määrittelemällä ontelolaatan poikkileikkauksen geometriset suureet. Geometrisiä suureita laskettaessa aloitetaan pinta-alan laskennasta, jonka jälkeen siirrytään painopisteen laskentaan. Pinta-alan ja painopisteen laskennan jälkeen voidaan määrittää rakenteen jäyhyysmomentti. Näiden edellä mainittujen suureiden jälkeen täytyy laskea ontelolaatan kriittisen leikkauksen paksuus, jota tarvitaan tämän jälkeen staattisen momentin ja leikkausvoiman laskennassa.

3.1 Pinta-ala



Kuva 9. Ontelolaatan yksinkertaistetut mitat (Kyllönen 2018).

Jännebetonirakenteet käsitellään muunnetuilla poikkileikkaussuureilla, jossa nettopoikkileikkaukseen lisätään raudoituksen pinta-ala kimmokertoimien suhteella kerrottuna. Muunnettua poikkileikkauksuuretta käytetään ontelolaatoissa myös siitä syystä, että ontelolaatan betonin pinta-ala on suhteellisen vähäinen. Alla oleva kaava on otettu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 203-204). Ontelolaatan pinta-aloja, painopistettä ja jäyhyysmomenttia laskettaessa ontelolaatta on jaettu kolmeksi osaksi, ympyräksi, suorakaiteeksi ja suorakulmaiseksi kolmioksi, millä yksinkertaistetaan laskuja. Ontelolaatan osat ja numeroinnit näkyvät kuvassa 9.

Poikkileikkauksen kaava:

$$A_i = A_c + (\alpha_e - 1)(A_{s1} + A_{s2}) \quad 3.1$$

missä

A_c	on laskettavan rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala [mm ²].
α_e	on betonin ja punosten kimmokertoimien suhde.
A_{s1}	on rakenteen alapuolisten punoksien pinta-ala [mm ²].
A_{s2}	on rakenteen yläpuolisten punoksien pinta-ala, kuitenkin esimerkissä ei tulla tarvitsemaan tätä arvoa, koska punoksia on pelkästään alhaalla [mm ²].

kaava sievenee muotoon:

$$A_i = A_c + (\alpha_e - 1)A_{s1} \quad 3.1$$

Laskettavan rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala saadaan matematiikan yleisiä laskusääntöjä käyttäen.

$$A_c = A_1 + A_2 - A_3 \quad 3.2$$

missä

A_1	on ontelolaatasta jaetun osan kolmion pinta-ala
A_2	on ontelolaatasta jaetun osan suorakaiteen pinta-ala
A_3	on ontelolaatasta jaetun osan ympyrän pinta-ala

Betonin ja jännepunosten kimmokertoimien suhde, minkä kaava on otettu by 211:sta (Suomen betoni yhdistys 2013, 204).

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad 3.3$$

missä

E_s	on jännepunosten kimmokerroin [N/mm ²].
E_c	on betonin kimmokerroin [N/mm ²].

Kimmokerroin tarkoittaa sitä, että materiaalin muodonmuutoksen on palautuvia, kunhan se ei ylitä tiettyä jännityksen arvoa, joka on betonissa 0,3-0,4 f_{cm} :sta. Betonin kimmokerroin saadaan betonin lujuusluokan perusteella alla olevasta kaavasta, joka on otettu by 211:sta (Suomen betoni yhdistys 2013, 43).

$$E_c = 22 \text{ GPa} \left(\frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0,3} \quad 3.4$$

missä

f_{cm}	on betonin puristuslujuuden keskiarvolujuus [MPa].
----------	--

Betonin puristuslujuuden keskiarvolujuus f_{cm} on suurempi kuin ominaislujuus f_{ck} , koska ominaislujuuden arvosta ollaan poistettu keskiarvon hajonta. Kaava on otettu by 211:sta (Suomen betoni yhdistys 2013, 36).

Betonin keskiarvolujuuden kaava:

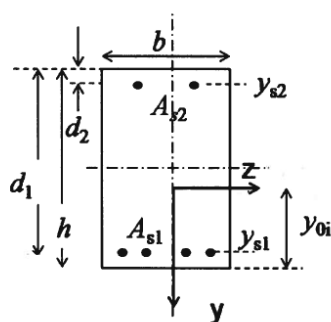
$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ MPa} \quad 3.5$$

missä

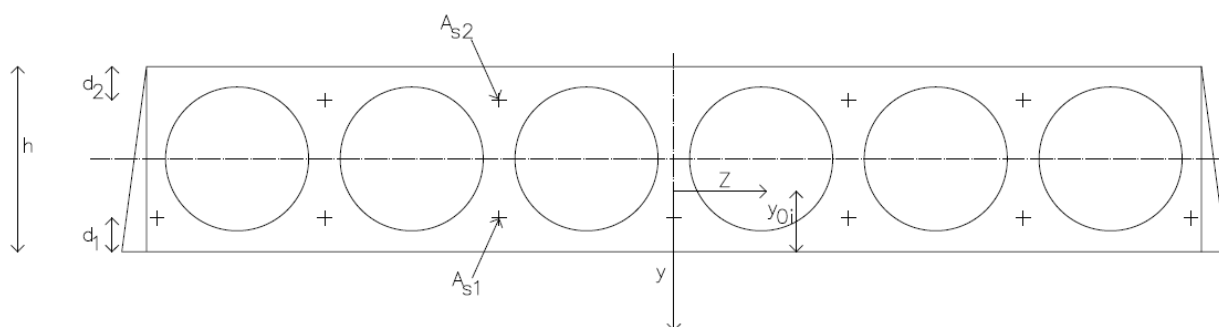
f_{ck}	on betonin lieriölujuus [MPa].
----------	--------------------------------

3.2 Painopiste

b) muunnettu poikkileikkaus



Kuva 10. Muunnetun poikkileikkauksen termit. (Suomen betoniyhdistys 2013, 204).



Kuva 11. Muunnetun poikkileikkauksen hahmotelma ja termit ontelolaatassa. (Kyllönen 2018).

Rakenteen poikkileikkauksen painopiste ei ole ontelolaatassa rakenteen korkeuden keskikohdassa, koska rakenne jaetaan kolmeen osaan kuvan 9 mukaisesti. Suorakaiteen ja ympyrän painopiste on kuitenkin rakenteen keskellä, koska suorakaiteen painopiste on korkeus jaettuna kahdella ja ympyrän painopiste on ympyrän säde, joka on rakenteen keskikohdassa ylä- ja alakannen ollessa saman korkuiset. Suorakulmaisen kolmion painopiste on taas kolmion pystysuoran kateetin kolmannespisteessä. Tästä syystä painopiste lasketaan osien pinta-alalla suhteutettuna. Painopiste täytyy laskea kahdesti jännepunokset huomioiden ja ilman jännepunoksia, joista saatuja arvoja tarvitaan rakenteen jäyhyysmomenttia laskettaessa. Alla oleva kaava on saatu lujuusopin kirjasta (Salmi, Pajunen, 2010, 410).

$$y_0 = \frac{A_1 * \frac{h}{3} + A_2 * \frac{h}{2} - A_3 * \frac{h}{2}}{A_c} \quad 3.6$$

missä

A_1	on ontelolaatasta jaetun osan kolmion pinta-ala [mm ²].
h	on rakenteen korkeus [mm].
A_2	on ontelolaatasta jaetun osan suorakaiteen pinta-ala [mm ²].
A_3	on ontelolaatasta jaetun osan ympyrän pinta-ala [mm ²].
A_c	on laskettavan rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala [mm ²].

Ideaalisen painopisteen määrittäminen. Tässä kaavassa otetaan huomioon jännepunokset betonin ja jännepunosten kimmokertoimien suhteella. Kaava on muokattu sopimaan ontelolaatan mitoitukseen,

erot palkin ja ontelolaatan mitoitukseen näkyvät kuvasta 10 ja 11. Alla oleva kaava on otettu by 211:sta (Suomen betoni yhdistys 2013, 204).

$$y_{0i} = \frac{y_0 A_c + (\alpha_e - 1)[A_{s1}(h - d_1) + A_{s2}(h - d_2)]}{A_i} \quad 3.7$$

missä

y_0	on poikkileikkauksen painopiste [mm].
A_c	on laskettavan rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala [mm ²].
α_e	on betonin ja jännepunosten kimmokertoimien suhde.
A_{s1}	on alapuolisten punoksien pinta-ala [mm ²].
h	on rakenteen korkeus, kuitenkin esimerkissä ei tulla tarvitsemaan tätä arvoa, koska ontelolaattoja mitoittaessa rakenteen painopiste ei ole poikkileikkauksen keskipisteessä [mm].
d_1	on etäisyys punoksien keskeltä rakenteen alareunaan [mm].
A_{s2}	on rakenteen yläpuolisten punoksien pinta-ala, kuitenkin esimerkissä ei tulla tarvitsemaan tätä arvoa, koska punoksia on pelkästään alhaalla [mm ²].
d_2	on etäisyys yläpuolisten punosten keskeltä rakenteen yläreunaan, kuitenkin esimerkissä ei tulla tarvitsemaan tätä arvoa, koska punokset ovat alhaalla [mm].
A_i	on rakenteen muunnettu poikkileikkauspinta-ala [mm ²].

kaava voidaan tässä tapauksessa sieventää muotoon, koska ontelolaatan laskussa ei ole yläpuolisia punoksia, sekä rakenteen painopiste ei sijaitse rakenteen korkeuden keskikohdassa:

$$y_{0i} = \frac{y_0 A_c + (\alpha_e - 1) * [A_{s1} d_1]}{A_i} \quad 3.7$$

3.3 Jäyhyysmomentti

Rakenteen jäyhyysmomentti, jota voidaan myös kutsua ideaaliseksi jäyhyysmomentiksi. Jäyhyysmomentti kuvaa rakenteen kykyä vastustaa taipumaa. Kaava on otettu kirjasta by211 (Suomen betoni yhdistys 2013, 204). Tällä kaavalla saadaan laskettua koko rakenteen jäyhyysmomentti, jossa on jännepunokset huomioitu betonin ja jännepunosten kimmokertoimien suhteella.

$$I_i = I_c + A_c(y_{0i} - y_0)^2 + (\alpha_e - 1)[A_{s1}(y_{0i} - d_1)^2 + A_{s2}(y_{0i} - d_2)^2] \quad 3.8$$

missä

I_c	on rakenteen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti [mm ⁴].
A_c	on laskettavan rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala [mm ²].
y_{0i}	on rakenteen ideaalinen painopiste [mm].

y_0	on poikkileikkauksen painopiste [mm].
α_e	on betonin ja punosten kimmokertoimien suhde
A_{s1}	on alapuolisten punoksien pinta-ala [mm ²]
d_1	on etäisyys punoksien keskeltä rakenteen alareunaan [mm].
A_{s2}	on rakenteen yläpuolisten punoksien pinta-ala, kuitenkin esimerkiksi ei tulla tarvitsemaan tätä arvoa, koska punoksia on pelkästään alhaalla [mm ²].
d_2	on etäisyys yläpuolisten punosten keskeltä rakenteen yläreunaan, kuitenkin esimerkiksi ei tulla tarvitsemaan tätä arvoa, koska punokset ovat alhaalla [mm].

kaava supistuu muotoon

$$I_i = I_c + A_c(y_{0i} - y_0)^2 + (\alpha_e - 1)[A_{s1}(y_{0i} - d_1)^2] \quad 3.8$$

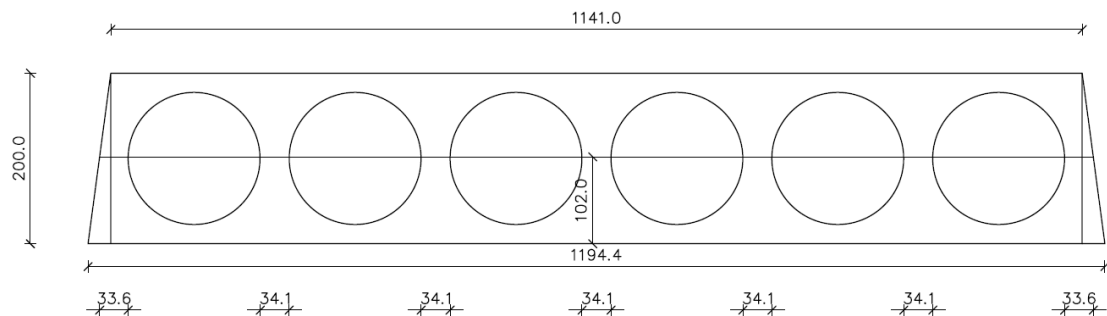
Rakenteen poikkileikkauksen jähyysmomenttia laskettaessa käytetään Steinerin sääntöä, jossa täytyy huomioida rakenteen poikkileikkauksen painopisteen ja rakenteen ideaalisen painopisteen erotus, koska ne eivät sijaitse samassa kohdassa. Tässä kohdassa täytyy myös huomioida kolmion, suorakaiteen ja ympyrän painopisteen sijainti, joista ympyrällä ja suorakaiteella painopiste on ontelolaatan korkeuden keskellä, mutta kolmiolla se on kolmion kolmannespisteessä. Edellä mainitun seikan lisäksi täytyy käyttää useampaa lujuusopin kaavaa, koska sitä laskettaessa ontelolaatta on jaettu kolmeen muotoon ympyräksi, kolmioksi ja suorakaiteeksi, jotka näkyvät kuvasta 1. Alla olevat kaavat on otettu lujuusopin kirjasta (Salmi, Pajunen, 2010 411,421-422). Tällä kaavalla saadaan betoniosien jähyysmomentti, jossa ei ole jännepunoksia huomioituna. T

$$I_c = \frac{bh^3}{12} + \frac{bh^3}{36} - \frac{\pi r^4}{4} + A_1(y_1 - y_0)^2 + A_2(y_2 - y_0)^2 - A_3(y_3 - y_0)^2 \quad 3.9$$

missä

$\frac{bh^3}{12}$	on suorakaiteen jähyysmomentin kaava [mm ⁴].
$\frac{bh^3}{36}$	on kolmion jähyysmomentin kaava [mm ⁴].
$\frac{\pi r^4}{4}$	on ympyrän jähyysmomentin kaava [mm ⁴].
A_1	on ontelolaatasta jaetun osan kolmion pinta-ala [mm ²].
y_1	on ontelolaatasta jaetun kolmion painopiste [mm].
y_0	on poikkileikkauksen painopiste [mm].
A_2	on ontelolaatasta jaetun osan suorakaiteen pinta-ala [mm ²].
y_2	on ontelolaatasta jaetun suorakulmion painopiste [mm].
A_3	on ontelolaatasta jaetun osan ympyrän pinta-ala [mm ²].
y_3	on ontelolaatasta jaetun ympyrän painopiste [mm].

3.4 Poikkileikkauksen leveys kriittisessä pisteessä



Kuva 12. Ontelolaatan mittakuva (Kyllönen 2018).

Poikkileikkauksen leveys kriittisessä pisteessä lasketaan siinä kohti, missä ontelolaatan uumat ovat ohuimmillaan. Kriittisen pisteen leveys lasketaan ontelolaatan ohuimmassa kohdassa siitä syystä, että mitoittavan leikkausjännityksen voidaan olettaa sijaitsevan ontelolaatan ohuimmassa kohdassa, koska leikkausmurtuma tapahtuu noin 35 asteen kulmassa ontelolaatan tuen päästä. Opinnäytetyössä käytetyn poikkileikkauksen uumien ohuimmat kohdat sijaitsevat ontelolaatan alapinnasta 102 millimetrin korkeudella. Poikkileikkauksen leveyttä on selvitetty enenmmän kappaleessa 6 leikkauskapasiteetti.

$$b_w = 2 * b_{w,1} + 5 * b_{w,2} \quad 3.10$$

missä

$b_{w,1}$ on ontelolaatan uuman paksuus ontelolaatan reunassa [mm].

$b_{w,2}$ on ontelolaatan uuman paksuus ontelolaatan onteloiden välissä [mm].

3.5 Staattinen momentti

Ontelolaatan poikkileikkauksen geometriisiin suureisiin kuuluu myös staattinen momenttin, jota tul-
laan tarvitsemaan ontelolaatan leikkaukskapasiteetin laskennassa. Kaava staattiseen momenttiin saa-
daan lujusopin kirjasta (Salmi, Pajunen, 2010, 409). Staattisen momentin laskemiseen käytetään
ontelolaatan siivuttamista, jota käydään tarkemmin läpi kappaleessa 7.

$$S = \sum y_s * A_{siivu} \quad 3.11$$

missä

y_s on etäisyys ideaalisesta painopisteestä ontelolaatan siivun painopisteeseen [mm].

A_s on siivun pinta-ala [mm²].

4 MATERIAALITIEDOT

Mitoituksessa käytettävistä materiaaleista ja varmuuskertoimista käydään läpi tässä kappaleessa. Tässä kappaleessa käydään läpi myös sellaisia kaavoja, joita tarvitaan ontelolaatan kapasiteettien laskennassa ja excel-työkirjan muodostamisessa.

Eurokoodissa on esitetty kolme erilaista jännitys-muodonmuutosriippuvuuden mallia, joista yksi soveltuu parhaiten tietokonelaskentaan, kun taas kaksi muuta soveltuu käsin laskemiseen. Laskentamallit määritetään nousevaa osaa kuvaamalla yhtälöllä ja puristuman raja-arvoilla ε_{ci} ja ε_{cu1} . Alla olevassa kaavassa, joka on saatu by 211:sta käsitellään tarkemmin mallia 2, jossa nouseva osa on paraabeli puristuman arvoon ε_{c2} asti ja vakio välillä ε_{c2} - ε_{cu2} . Kaavassa olevat termit ε_{c2} , ε_{cu2} ja n ovat vakioita betonin lujuusluokkaan C50/60 asti (Suomen betoniyhdistys 2013, 40). Kaava on otettu by 211:sta.

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right], \text{ kun } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad 4.1$$

$$\sigma_c = f_{cd}, \text{ kun } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad 4.1$$

missä

f_{cd}	on betonin suunnittelupuristuslujuuden arvo [MPa].
ε_c	on betonin puristuman arvo [‰].
ε_{c2}	on betonin myötyöpuristuman arvo, kun on saavutettu suurin betonin lujuus, jonka arvo on 2,0 ‰.
n	on eksponentti, joka on 2.
ε_{cu2}	on betonin murtopuristuman arvo, mikä on 3,5 ‰.

Betonin suunnittelupuristuslujuuden arvo saadaan kaavasta, jossa käytetään Suomen suositusarvoja. Kaava on saatu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 36).

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad 4.2$$

missä

α_{cc}	on betonin puristuslujuuskerroin, mikä on Suomessa 0,85. Tämä kerroin ottaa huomioon puristuslujuuteen vaikuttavat pitkäaikaistekijät ja kuorman vaikuttamistavasta aiheutuvat epäedulliset tekijät (SFS 202, 234).
f_{ck}	on betonin lieriölujuus [MPa].
γ_c	on betonin materiaaliosavarmuusluku.

Punoksen lujuuden ominaisarvon määrittämiseen käytetään alla olevaa kaavaa, jossa käytetään $f_{p0,1k}$ arvoa. $f_{p0,1k}$ arvoa käytetään siitä syystä, että punoksen valmistamisessa käytetään kylmävedettyä punosta ja kylmämuokatulla teräksellä ei ole selvää myötörajaa, vaan siinä tapahtuu hiljattainen siirtyminen kimmoisesta käyttäytymisestä plastiseen käyttäytymiseen (Suomen betoniyhdistys 2005, 60-61). $f_{p0,1k}$ on jänneterästen 0,1-raja, mikä määrittää vastaavalla tavalla, kuin kylmämuokatun teräksen 0,2-raja (Suomen betoniyhdistys 2005, 67). Kaava on saatu Eurokoodi 2:sta (Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, 45-46).

$$f_{pd} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} \quad 4.3$$

missä

$f_{p0,1k}$ on jännepunosten myötöraja [N/mm²].

γ_s on materiaalin varmuuskerroin, tässä tapauksessa 1,1.

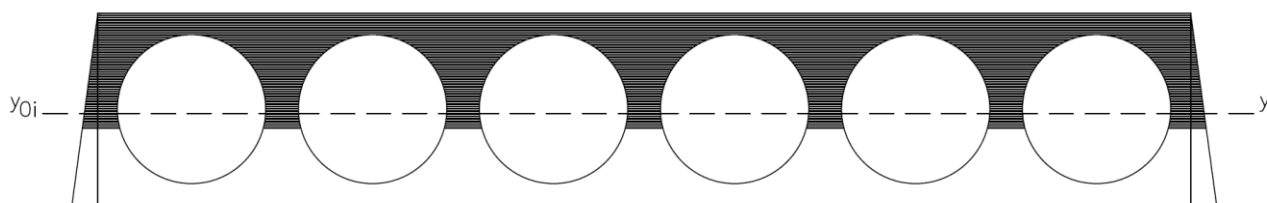
4.1 Materiaalien varmuuskertoimet

Laskennassa varmuuskertoimina käytetään yleensä betonille $\gamma_c=1,5$ ja teräkselle $\gamma_s=1,15$, mutta ontelolaattoja laskettaessa voidaan käyttää pienennettyjä arvoja, jotka ovat $\gamma_c=1,35$ ja $\gamma_s=1,1$. Kuitenkin laskettaessa laukaisutilanteen betonin vetolujuuden mitoitusarvoa on materiaalin osavarmuuskerroin $\gamma_c=1,5$ (Ontelolaattojen mitoitus eurokoodin mukaan, 1). Pienennettyjä arvoja voidaan käyttää siitä syystä, että ontelolaattojen valmistukseen kuuluu laadunvalvontajärjestelmä, sekä vaatimustenmukaisuuden osoittamismenettely (Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu, 196), tämän edellä mainitun seikan takia betonin ja jännepunoksien varmuuskerrointa voidaan pienentää. Lisäksi ontelolaatan valmistustavan ollessa liukuvalettu, niin elementeille saavutetaan ”hyvät” tartuntaolosuhteet (SFS 1168 + A3, 11).

5 TAIVUTUSKAPASITEETTI

Taivutusmurtuminen on tavallisimmissa tapauksissa toivottavain murtumistapa verrattuna leikkausmurtumaan ontelolaatoissa, koska se hallitaan parhaiten. Taivutusmurto ontelolaatoissa on käytännössä aina sitkeä ja ennen taivutusmurtoa se tuottaa suuren taipuman ontelolaattaan. Punosten määrästä riippuen taivutusmurrossa voidaan päätyä tilanteeseen, jossa punokset myötäävät ja saatavat katketa, ennen kuin betonin murtopuristuma pääsee tapahtumaan. Edellä mainittu tapahtuma on mahdollista ontelolaatoissa, joissa jännepunoksia on vähän (Suomen betoniyhdistys 2005, 687-688).

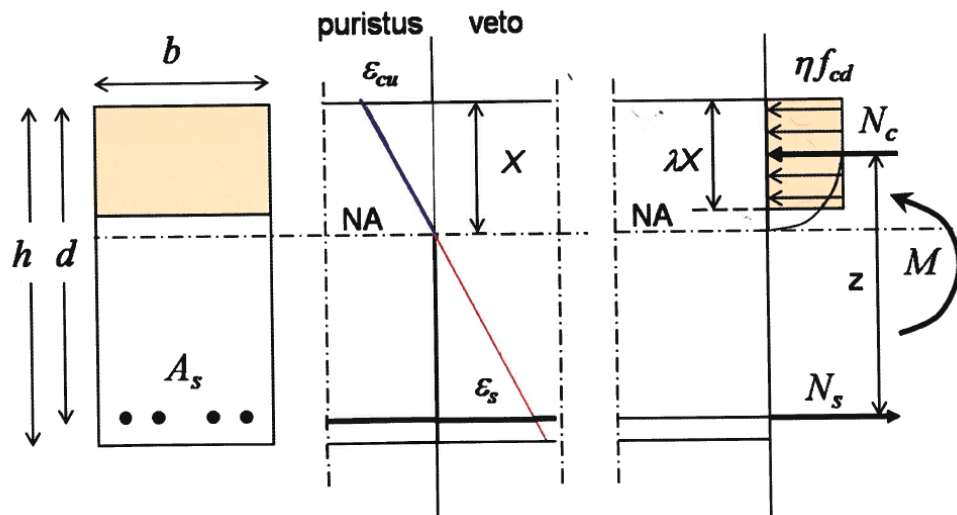
Ontelolaattojen taivutuskestävyys lasketaan samalla tavalla, kuin esijännitettyjen palkkien taivutuskestävyys. Taivutuskestävyys lasketaan vertailemalla jännepunosten murtovoimaa betonin puristusresultanttiin. Poikkeuksena palkkien laskentaan verrattuna on, että ontelolaatassa puristuspuoli voi ulottua onteloon, jolloin ontelolaatta siivutetaan puristuspuolen yläpinnasta lähtien. Toisin sanottuna ontelolaatta jaetaan siivuihin yläpinnasta lähtien alaspäin tietyn etäisyyden verran. Tässä opinnäytetyössä käytetään 1 millimetrin korkuisia siivuja laskujen helpottamiseksi.



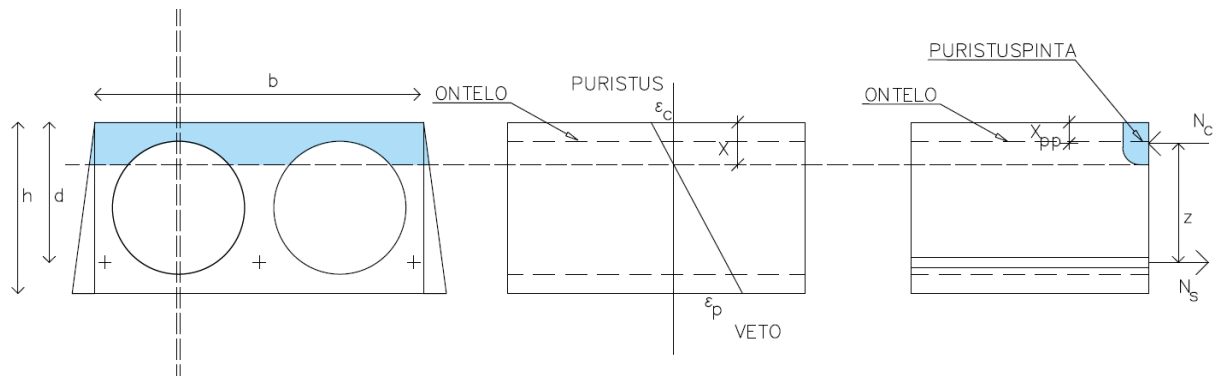
kuva 13. Ontelolaatan siivutus (Kyllönen 2018).

Yläpuolella olevasta kuvasta näkyy ontelolaatan siivutus, mutta koska siivuja on 1 millimetrin välein kuva näyttää sille, että osa ontelolaatasta on mustattu. Siivutuksella saadaan laskettua puristuspuolelta painopiste, jonka kaava tulee vastaan tämän kappaleen laskentakaavoissa. Puristetun reunan painopiste suorakaidepoikkileikkauksissa saadaan helpommilla keinoilla, kuten kuvasta 14 Suorakaidepoikkileikkauksen taivutusmitoitus huomataan. Kuvan 14 puristuspuolelta painopiste saadaan kertomalla X , eli puristuspuolelta korkeus kertoimella λ , jonka tulos täytyy jakaa kahdella, jotta saataisiin painopiste. Ontelolaatassa taas puristuspuoli menee onteloon, kuten kuvasta 15 Ontelolaatan taivutusmitoitus huomataan. X täytyy tässä tapauksessa ratkaista iteroimalla betonin puristumaa ja jännepunosten venymää, jotta saadaan betonin kokonaisvoima puristuspuolelta ja jännepunosten murtovoima saman suuruisiksi.

Iterointi on erittäin työlästä laskea käsin, joten tätä varten täytyy tehdä Excel-työkirja, jolla pystytään suorittamaan iterointi. Iteroinnin suorittamiseen tarvitaan siivun pituus, siivun etäisyys rakenteen ideaalisesta painopisteestä ja siivujen lukumäärä. Siivujen korkeudeksi valitaan laskujen yksinkertaistamiseksi 1 millimetri. Edellä mainituista syistä myös ontelolaatan ideaalisen painopisteen korkeus pyöristetään 0,5 millimetrin tarkkuudella.



kuva 14. Suorakaidepoikkileikkauksen taivutusmitoitus (Suomen betoniyhdistys 2013, 94).



kuva 15. Ontelolaatan taivutusmitoitus (Kyllönen 2018).

Taivutuskestävyys määritetään tässä tapauksessa taivutusraudoituksen kestävyiden avulla, koska esimerkklaskussa ontelolaatta on yksiaukkoinen rakenne, johon ei tule yläpintaan momenttia. Kaava on otettu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 95).

$$M_{RS} = N_{rs}z \quad 5.1$$

missä

$N_{rs} = f_{pd}$ on jännepunosten murtokestävyys [N/mm^2].

z on rakenteen sisäinen momenttivarsi [mm].

Rakenteen sisäinen momenttivarsi täytyy laskea siivuttamalla ontelolaatan yläpinta, koska puristus-pinnan painopiste menee onteloon 7 jännepunoksella. Siivutuksen jälkeen saadaan selvitettyä rakenteen puristuspinnan painopiste. Tämä painopiste täytyy tämän jälkeen vähentää poikkileikkauksen hyötykorkeudesta.

$$z = d - x_{pp} \quad 5.2$$

missä

d on rakenteen tehollinen korkeus [mm].

x_{pp} on puristuspinnan painopiste [mm].

Rakenteen puristuspinnan korkeus saadaan alla olevasta kaavasta, joka on otettu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 96). Tällä kaavalla saadaan selvitettyä, millä korkeudella rakenne muuttuu puristetusta vedetyksi.

$$\frac{x}{d} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} \quad 5.3$$

missä

x on puristuspinnan korkeus [mm].
 d on rakenteen tehollinen korkeus [mm].
 ε_c on betonin purisuman arvo [‰].
 ε_p on jänneterästen venymän arvo [‰].

Koska tällä kaavalla lasketaan puristuspinnan korkeutta, niin kaava kerrotaan puolittain d:llä, jolloin kaava on muotoa.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} * d \quad 5.3$$

Puristuspinnan painopiste määritetään alla olevalla kaavalla

$$x_{pp} = (h - y_{0i}) - \frac{\sum(N_c * y_{(x)})}{\sum N_c} \quad 5.4$$

missä

h on rakenteen korkeus [mm].
 y_{0i} on rakenteen ideaalinen painopiste [mm].
 $\sum N_c$ on yhteenlaskettu kokonaisvoima puristuspinnan korkeudelta [N].
 $y_{(x)}$ on siivun etäisyys ontelolaatan ideaalisesta painopisteestä [mm].

Yllä olevassa kaavassa $N_c * y_{(x)}$ arvo täytyy laskea jokaiselle siivulle ja tämän jälkeen laskea yhteen ja jakaa yhteenlasketulla kokonaisvoimalla puristuspinnan korkeudelta.

Alla olevassa kaavassa lasketaan ontelolaattaan kohdistuvaa kokonaisvoimaa yhden siivun kohdalla.

$$N_{c(x)} = A_{siivu} * \sigma_{c(x)} \quad 5.5$$

missä

A_{siivu} on laskettavan siivun pinta-ala [mm²].
 $\sigma_{c(x)}$ on laskettavan siivun puristusjännitys [N/mm²].

Materiaalitiedoissa mainitussa kohdassa on käyty tarkemmin betonin jännityksen kaava, joka noudattaa betonin jännitys-muodonmuutosriippuvuuden mallia. Alla oleva kaava on otettu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 40).

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right], \text{ kun } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad 4.1$$

$$\sigma_c = f_{cd}, \text{ kun } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad 4.1$$

missä

f_{cd}	on betonin suunnittelupuristuslujuuden arvo [MPa].
ε_c	on betonin puristuman arvo [‰].
ε_{c2}	on betonin myötyöpuristuman arvo, kun on saavutettu suurin betonin lujuus, jonka arvo on 2,0 ‰.
n	on eksponentti, joka on 2.
ε_{cu2}	on betonin murtopuristuman arvo, mikä on 3,5 ‰.

Betonin puristuksen arvo saadaan iteroimalla, jonka teoria ja kaavat käydään läpi luvussa 7. Samassa kohdassa käydään myös Excel-työkirjaan lisättäviä kaavoja tarkemmin läpi.

6 LEIKKAUSKAPASITEETTI

Puhdas leikkausmurto syntyy halkeamasta ja on pääasiassa riippuvainen vain poikkileikkauksen dimensioista ja betonin laadusta, varsinkin betonin vetolujuuden arvosta. Rakenteen murtuminen on äkillinen ja tapahtuu ilman ennakkovaroitusta, eli ilman silmin havaittavia ennakkomerkkejä sillä alueella, missä jännevoima ei ole kehittynyt täydeksi. Leikkausmurron halkeama alkaa uumasta, läheltä painopistettä ja alkaa siirtyä painopisteen läheisyydestä ala- ja yläkansiin kohti samanaikaisesti. (Suomen betoniyhdistys 2005, 661,687). Leikkausmurron halkeaman kulma on n. 35 astetta kuten kuvasta 16 nähdään, ja tästä syystä leikkauskestävyyden laskuissa käytetään 35 asteen kulmaa tarvittavissa kohdissa.



kuva 16. 200 millimetriä korkean ontelolaatan kuormituskoe (Taskinen, 2017).

Esijännityksestä aiheutuva puristusjännitys parantaa ontelolaatan leikkauskestävyyttä, mutta laatan päähän syntyvät halkaisujännitykset esijännityksestä taas heikentävät leikkauskestävyyttä, jos ne ylittävät mitoituksessa käytettävän betonin vetolujuuden f_{ctm} :n arvon, tästä syystä ontelolaatan leikkauskestävyys pitää laskea jännityksen siirtymämatkan ala- sekä yläarvoa käyttäen (Ontelolaattojen suunnittelu eurocoden mukaan,1).

Leikkauskapasiteetin mitoituksessa käytettiin ennen eurokoodia alla olevaa kaavaa, joka on otettu by 210:sta (Suomen betoniyhdistys 2005, 687). Tämä on kuitenkin yksinkertaistettu kaava, tämä kaava on sisällytetty opinnäytetyöhön siitä syystä, että pystyttäisiin vertailemaan ennen eurokoodia käytettyä kaavaa ja eurokoodin mukaista kaavaa.

$$V_{Rd.c.II} = \alpha_R \frac{I_l b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd,lop.})^2 + \alpha_I \sigma_{cp} f_{ctd}}$$

missä

α_R	on pienennyskerroin, jonka arvo on 0,8.
I_i	on poikkileikkauksen ideaali jäyhyysmomentti [mm ⁴]
b_w	on poikkileikkauksen leveys painopisteen kohdalla, mutta tässä käytetään ontelolaatan uuman ohuinta kohtaa, koska voidaan olettaa, että suurin päävetojännitys esiintyy siellä [mm].
S	on poikkileikkauksen painopisteen yläpuolisen osan staattinen momentti [mm ³].
$f_{ctd,lop.}$	on betonin vetolujuuden mitoitusarvo lopputilanteessa [MPa].
α_I	on $\frac{l_x}{l_{pt2}}$
σ_{cp}	on jännityksen aiheuttama puristusvoima betoniin [MPa].

Betonin vetolujuuden mitoitusarvo saadaan alla olevasta kaavasta, joka on otettu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 37). Rakennetta ei suunnitella toimivaksi murtorajatilassa vetolujuuden varassa, vaan veto otetaan vastaan tässä tapauksessa jännepunoksilla, kuitenkin vetolujuutta hyödynnetään murtorajatilan laskennassa leikkauskestävyyttä määriteltäessä.

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad 6.2$$

missä

α_{ct}	on betonin vetolujuuskerroin, mikä on Suomessa 1,00.
$f_{ctk,0,05}$	on betonin vetolujuuden 5%:n alaraja-arvo [MPa].
γ_c	on betonin materiaaliosavarmuusluku, joka on 1,35. Laukaisutilanteessa materiaaliosavarmuusluku on 1,5.

Betonin vetolujuuden 5%:n alaraja-arvo saadaan kaavasta, joka on otettu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 36). f_{ctm} :n kaavasta saatava lujuus on laskettavan lujuusluokan vetolujuuden keskiarvo, ominaislujuus kuitenkin tulee laskea alla olevalla kaavalla.

$$f_{ctk,0,05} = 0.7 * f_{ctm} \quad 6.3$$

missä

f_{ctm}	on betonin mitoituksessa käytettävä vetolujuus [MPa].
-----------	---

Mitoituksessa käytettävä vetolujuus tarkoittaa suoraa vetolujuutta, jonka suuruus on noin 5-8-% puristuslujuudesta. Alhaisissa lujuusluokissa suuruus on 8%, kun taas korkeammissa lujuusluokissa 5%. Vetolujuus lasketaan lujuusluokan perusteella kaavasta, joka on saatu by 211:sta (Suomen betoniyhdistys 2013, 37).

$$f_{ctm} = 0,30 \text{ MPa} * \left(\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} \right)^{2/3}, \text{ kun } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad 6.4$$

$$f_{ctm} = 2,12 \text{ MPa} * \ln \left(1 + \frac{f_{cm}}{10 \text{ MPa}} \right), \text{ kun } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad 6.5$$

missä

f_{ck} on betonin lieriölujuus [MPa].

f_{cm} on betonin puristuslujuuden keskiarvo [MPa].

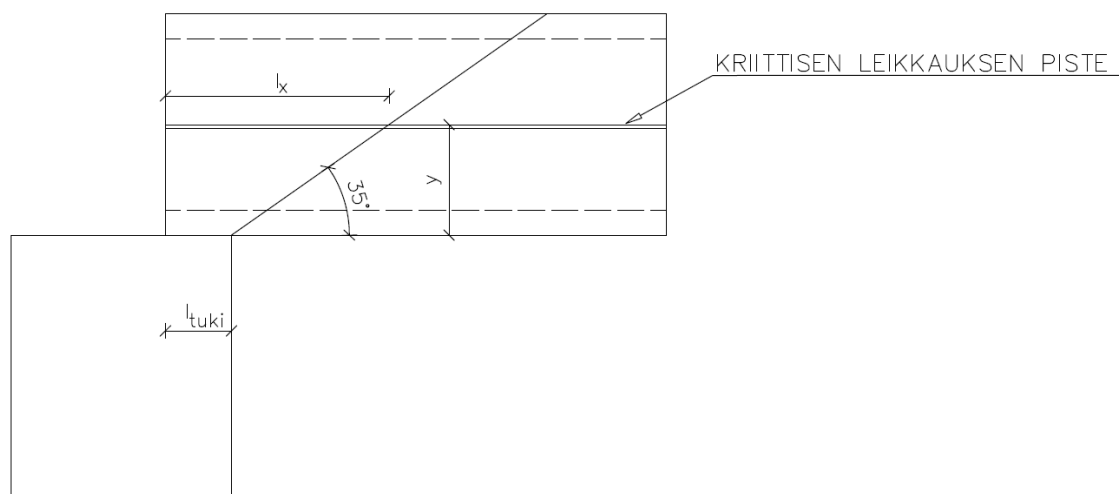
Alla olevassa kaavassa lasketaan kriittisen leikkauksen pistettä suhteessa jännepunoksen tartuntapisteeseen, jonka kaava on otettu by 210:sta (Suomen betoniyhdistys 2005, 603).

$$\alpha_l = \frac{l_x}{l_{pt2}} \quad 6.6$$

missä

l_x on siirtymäpituuden alusta mitattu etäisyys tarkasteluleikkaukseen [mm].

l_{pt2} on pituus, jossa jännepunos tarttuu betoniin ja siirtää jännityksestä saadut voimat betoniin [mm].



kuva 17. Kriittisen leikkauksen piste (Kyllönen 2018).

Alla olevassa kaavassa lasketaan kriittisen leikkauksen pistettä, eli missä kohdin leikkausmurto ja ontelolaatan leikkauskestävyyden mitoittava kohta sijaitsee. Leikkausmurtuman tapahtuessa noin 35 asteen kulmassa, niin kriittisen pisteen laskennassa käytetään tangenttia, kuten kuvasta 17 nähdään. Ontelolaatan leikkauskestävyyden mitoittava kohta sijaitsee siinä kohdin, missä ontelolaatan uumien leveydet ovat pienimmät. Eli ympyräonteloisilla ontelolaatoilla keskikohdassa ja muotoilluilla onteloilla uuman suoran osan alareunassa.

$$l_x = l_{tuki} + \frac{y}{\tan 35} \quad 6.7$$

missä

y	on poikkileikkauksen kriittisen pisteen etäisyys alareunasta [mm].
l_{tuki}	on ontelolaatan tukipituus [mm].
h	on ontelolaatan korkeus [mm].

Alla olevassa kaavassa lasketaan pituutta, jolla jännepunos tarttuu betoniin ja siirtää jännittämisestä saadut voimat betoniin. Kaava on saatu kirjasta by 210 (Suomen betoniyhdistys 2005, 603)

$$l_{pt} = \alpha_1 \alpha_2 \emptyset \frac{\sigma_{pm0}}{f_{bpt}} \quad 6.8$$

missä

α_1	on 1,25 kun jännityksen päästö tapahtuu nopeasti.
α_2	on 0,19 3- ja 7-lankaisissa punoksissa.
\emptyset	on jännepunoksen halkaisija [mm].
σ_{pm0}	on punoksen jännitys heti jännityksen päästön jälkeen [MPa].
f_{bpt}	on jännevoiman edullinen tai epäedullinen vaikutus kestävyYTEEN [MPa].

Alla olevassa kaavassa lasketaan punosten tartuntalujuutta. Kaava on otettu kirjasta by 210 (Suomen betoniyhdistys 2005, 602)

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_1 f_{ctd}(t) \quad 6.9$$

missä

η_{p1}	on 3,2 3- ja 7-lankaisille punoksille
η_1	on 1,0 hyvässä tartuntatilassa

$f_{ctd}(t)$ on betonin vetolujuuden mitoitusarvo jännevoiman siirtohetkellä [MPa].

Alla olevassa kaavassa lasketaan varmuuskerroin jännepunoksen tartuntapituudelle, joka on 1,2 tai 0,8 murtorajatilassa leikkauskestävyyttä tarkasteltaessa, koska jännevoimalla on epäedullinen vaikutus tarkasteltavaan kestävyYTEEN, niin varmuuskerroin on tässä tapauksessa 1,2 (Suomen betoniyhdistys 2005, 602,604). Kaava on otettu by 210:sta (Suomen betoniyhdistys 2005, 603)

$$l_{pt2} = 1,2 * l_{pt} \quad 6.10$$

Tässä kaavassa lasketaan esijännittämisen aiheuttamaa puristusjännitystä betoniin. Kaava on saatu by 210:sta (Suomen betoniyhdistys 2005, 695).

$$\sigma_{cp} = \frac{\alpha P}{A_c} \quad 6.11$$

missä

α on pienennyskerroin, jonka arvo Suomessa on 0,9.

P on ontelolaatan jännevoiman arvo jännityshäviöiden vähennyksien jälkeen [N].

A_c on rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala [mm²].

Leikkauskestävyyden määrittämisessä tulisi käyttää alla olevaa kaavaa. Tässä kaavassa tarkastellaan tarkemmin ontelolaatan leikkausjännityksiä ja puristusjännityksiä verrattuna aiempaan kaavaan. Aiemmassa kaavassa numero 6.1 on nämä otettu huomioon kertomalla tulos 0,8:lla. Tässä kaavassa tulee käyttää y :n arvona ontelolaatan poikkileikkauksen ohuinta kohtaa, jonka pituus mitataan ontelolaatan alapinnasta. Kaava on otettu ontelolaattojen SFS-standardista (SFS 1168+A3, 15-16).

$$V_{Rdc} = \frac{I_i b_w(y)}{S_c(y)} \left(\sqrt{(f_{ctd})^2 + \sigma_{cp}(y) f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right)$$

missä

I_i on rakenteen ideaalinen jäyhyysmomentti [mm⁴].

$b_w(y)$ on poikkileikkauksen leveys painopisteen kohdalla, mutta tässä käytetään ontelolaatan uuman ohuinta kohtaa, koska voidaan olettaa, että suurin päävetojännitys esiintyy siellä [mm].

S on ontelolaatan kriittisen pisteen yläpuolisen osan staattinen momentti [mm³].

f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo [MPa].

$\sigma_{cp}(y)$ on betonin puristusjännitys korkeudella y ja etäisyydellä l_x [N/mm²].

$\tau_{cp}(y)$ on betonin leikkausjännitys, joka aiheutuu jännevoiman siirtymisestä korkeudella y ja etäisyydellä l_x [N/mm²].

missä

$$\sigma_{cp}(y) = \sum_{t=1}^n = \left\{ \left[\frac{1}{A_i} + \frac{(y_{0i} - y)(y_{0i} - e_p)}{I_i} \right] * P_t(l_x) \right\} - \frac{M_{Ed}}{I_c} * (y_{0i} - y) \quad 6.13$$

A_i	on rakenteen muunnettu poikkileikkauspinta-ala[mm ²].
y_{0i}	on rakenteen ideaalinen painopiste [mm].
y	on kriittisen pisteen sijainti ontelolaatan alapinnasta [mm].
e_p	on tarkasteltavan jännekerroksen sijainnin korkeus [mm].
I_c	on rakenteen poikkileikkauksen jäyhyysmomentti [mm ⁴].
P	on ontelolaatan jännevoiman arvo jännityshäviöiden vähennyksien jälkeen [N].
$P_t(l_x)$	on tarkasteltavan jännekerroksen jännevoima jännityshäviöiden jälkeen etäisyydellä l_x [N].
l_x	on siirtymäpituuden alusta mitattu etäisyys tarkasteluleikkaukseen [mm].
M_{Ed}	on ontelolaattaan kohdistuvan kuorman aiheuttama taivutusmomentti kriittisessä pisteessä[kNm]. Tätä termiä käytetään selvemmin läpi las- kuissa, sekä selventävä kuva on 11.
y	on poikkileikkauksen kriittisen pisteen etäisyys alareunasta [mm].

ja

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{b_w(y)} * \sum_{t=1}^n = \left\{ \left[\frac{A_c(y)}{A_i} - \frac{S * (y_{0i} - e_p)}{I_i} + C_{P_t}(y) \right] * \frac{dP_t(l_x)}{dx} \right\} \quad 6.14$$

missä

$b_w(y)$	on poikkileikkauksen leveys painopisteen kohdalla, mutta tässä käytetään ontelolaatan uuman ohuinta kohtaa, koska voidaan olettaa, että suurin päävetojännitys esiintyy siellä [mm].
$A_c(y)$	on kriittisen pisteen y yläpuolella oleva pinta-ala [mm ²].
A_i	on rakenteen muunnettu poikkileikkauspinta-ala[mm ²].
$S(y)$	on poikkileikkauksen painopisteen yläpuolisen osan staattinen momentti [mm ³].
e_p	on tarkasteltavan jännekerroksen sijainnin korkeus [mm].

$C_{P_t}(y)$	on tekijä, jolla huomioidaan tarkasteltavan jännekerroksen sijainti.
P	on ontelolaatan jännevoiman arvo jännityshäviöiden vähennyksien jälkeen [N].
l_x	on siirtymäpituuden alusta mitattu etäisyys tarkasteluleikkaukseen [mm].

Yllä olevissa kaavoissa lasketaan ontelolaattaan kohdistuvaa leikkaus- ja puristusjännitystä. Edellä mainittuja jännityksiä tarkastellaan samalla korkeudella, kuin missä ontelolaatan uumien yhteenlaskettu leveys on pienimmillään. Toisin sanoen siinä kohdin, missä on ontelolaatan leikkauskestävyyden kriittinen piste.

Puristusjännitystä laskettaessa täytyy myös ottaa huomioon ontelolaatalle tulevat kuormat ja laskea taivutusmomentti kriittisen leikkauksen kohdassa.

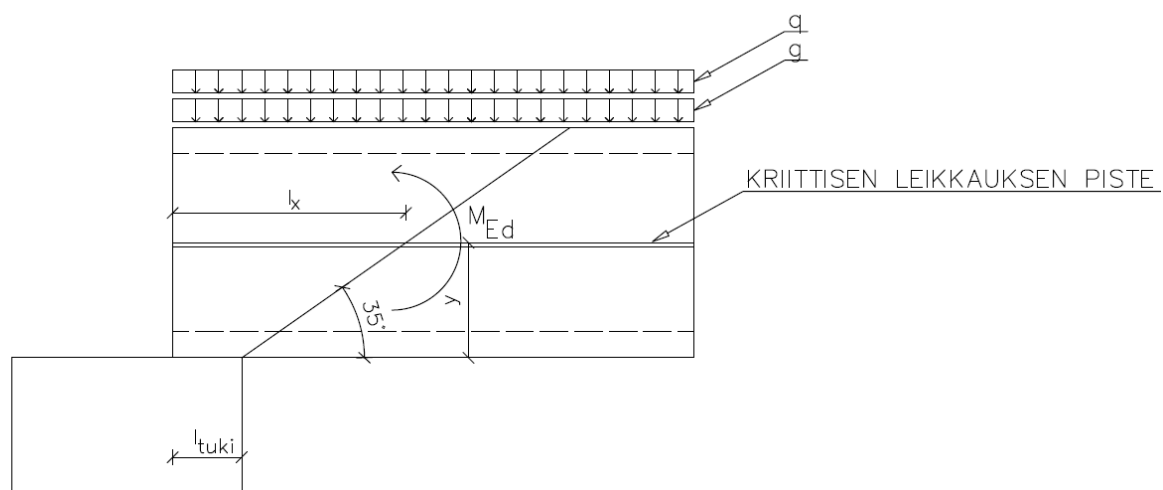
$$M_{Ed} = A * l_{(x)} - \frac{P_d * l_{(x)}^2}{2}$$

Alla olevassa kaavassa lasketaan punosten esijännityksestä tulevaa voimaa kriittisen pisteen kohdassa. Tässä kohdassa arvo tulee tutkia varmuuskertoimilla 0,9 ja 1,1 ja valita niistä heikomman tuloksen antava (Ontelolaattojen suunnittelu eurocoden mukaan, 3).

$$P_t(l_x) = \gamma_p * P * A_{s1} * \frac{l_x}{l_{pt2}}$$

missä

γ_p	on varmuuskerroin, jonka arvo on 0,9 tai 1,1.
P	on ontelolaatan jännevoiman arvo jännityshäviöiden vähennyksien jälkeen [N].
A_{s1}	on rakenteen alapuolisten punoksien pinta-ala [mm ²].
l_x	on siirtymäpituuden alusta mitattu etäisyys tarkasteluleikkaukseen [mm].
l_{pt2}	on pituus, jossa jännepunos tarttuu betoniin ja siirtää jännityksestä saadut voimat betoniin [mm].



kuva 18. Leikkakestävyden kriittisen pisteen momentti (Kyllönen 2018).

7 EXCEL-TYÖKIRJA

Kuten aikasemmissa kappaleissa on todettu, niin ontelolaattojen kapasiteettien laskennassa on kohtia, jotka ovat erittäin hankala laskea käsin. Edellä mainitusta syystä opinnäytetyötä varten tehdään excel-työkirja, jolla lasketaan hankalimmat kohdat. Tässä kappaleessa avataan excel-työkirjan laskentakaavoja ja tapoja.

7.1 Siivun pituus ja sijainti

Ontelolaatan siivutuksen jälkeen pystytään laskemaan ontelolaatan yksittäisen siivun pituus. Ontelolaatan siivujen pituus saadaan käyttämällä matematiikan kaavoja, kuten suorakulmaisen kolmion ja ympyrän laskukaavoja. Siivujen pituuksia laskettaessa täytyy huomioida myös ontelot, jotka täytyy vähentää siivun pituudesta. Exceliä käytettäessä alla olevat kaavat on helppo muuttaa sellaiseen muotoon, joka laskee automaattisesti siivun pituudet.

$$b_{(x)} = l1_{(x)} + l2_{(x)}, \text{ kun } (x) < 22 \quad 7.1$$

$$b_{(x)} = l1_{(x)} + l2_{(x)} - l3_{(x)}, \text{ kun } (x) > 22 \quad 7.2$$

missä

$l1$	on suorakulmion pituus [mm].
$l2$	on kolmion kannan pituus [mm].
$l3$	on ontelon pituus [mm].

Siivun sijainnin laskemiseen käytetään alla olevaa kaavaa. Kaavaa käytettäessä voidaan käyttää hyväksi siivun numerointia, koska siivujen korkeudet ovat valittu 1 mm:n välein, joten kaava toimii laskettaessa mielivaltaisen siivun sijaintia. Kaava toimii kuitenkin vain ideaaliseen painopisteeseen asti, mutta ontelolaattojen kapasiteettien laskennassa ei tarvita tietoja ideaalisen painopisteen alapuolelta.

$$y_{(x)} = (h - y_{0i}) - d_{(x)} \quad 7.3$$

missä

h	on rakenteen korkeus [mm].
y_{0i}	on rakenteen ideaali painopiste [mm].
$d_{(x)}$	on siivun etäisyys rakenteen yläpinnasta [mm].

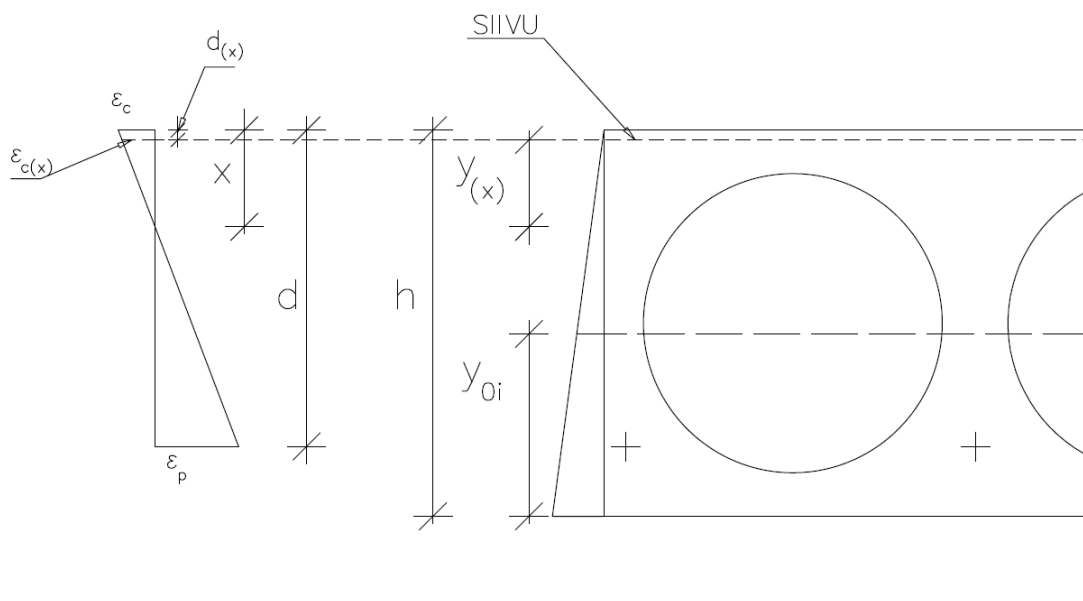
7.2 Staattinen momentti

Ontelolaatan staattisen momentin laskennassa käytetään myös Excel-työkirjaa, koska se olisi erittäin hankala laskea käsin. Staattisen momenttiin tarvitaan siivun sijainti ideaalisesta painopisteestä ja siivun pinta-ala. Staattinen momentti tulisi kuitenkin laskea aina käyttäen laskettavan osan painopistettä, mutta tässä opinnäytetyössä yksinkertaistamisen vuoksi käytetään siivun alaosan etäisyyttä

ontelolaatan ideaaliseen painopisteeseen. Alla oleva kaava tehdään yhteen excelin soluun, joka laskee näin ollen ontelolaatan siivun staattisen momentin, jotka lasketaan yhteen. Alue, jolta staattinen momentti otetaan on ontelolaatan kriittisen leikkauksen yläpuolelta.

$$S = \sum (y_s * A_{siivu}) \quad 3.11$$

7.3 Betonin puristus



Kuva 19. Ontelolaatan siivun puristuksen laskenta (Kyllönen 2018).

Betonin puristusta lasketaan siivujen avulla, sekä käyttäen matematiikan perusyhtälöitä. Tätä laskentaa varten täytyy käyttää kolmea kaavaa, jotka yhdistetään ja muodostetaan yksi kaava, joka laskee betonin puristumaa siivun kohdalla. Tämä kaava lisätään sen jälkeen kappaleessa 4. Materiaalitiedot kohdassa esitettyyn jännitys-muodonmuutosriippuvuuden kaavaan, jolla lasketaan betonin puristusjännitys.

Ensimmäinen kaava, johon kaksi muuta kaavaa lisätään. Tämä kaava vertailee kahden suorakulmaisen kolmion kantoja, josta saadaan määritettyä arvo yhden siivun puristukselle.

$$\frac{x}{\varepsilon_c} = \frac{x - d_{(x)}}{\varepsilon_{c(x)}} \quad 7.4$$

yllä olevasta kaavasta ratkaistaan $\varepsilon_{c(x)}$, jolloin kaava on muotoa

$$\varepsilon_{c(x)} = \frac{\varepsilon_c (x - d_{(x)})}{x} \quad 7.4$$

toinen kaava on sama, mitä käytetään puristuspinnan korkeuden laskemisessa.

$$x = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} * d \quad 5.3$$

kolmas kaava, jota käytetään on sama kuin siivun sijainnin määrittämisessä. Tätä kaavaa tarvitaan ensimmäiseen kaavaan siivun korkeuden kohdalle.

$$y_{(x)} = (h - y_{0i}) - d_{(x)} \quad 7.3$$

yllä olevasta kaavasta ratkaistaan $d_{(x)}$, jolloin kaava on muotoa

$$d_{(x)} = (h - y_{0i}) - y_{(x)} \quad 7.3$$

Tämän jälkeen kaavat 5.3 ja 7.3 sijoitetaan kaavaan 7.4, jolloin saadaan laskettua laskettua siivun puristuksen arvo. Kaava on muotoa

$$\varepsilon_{c(x)} = \frac{\varepsilon_c \left[\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} * d \right) - (h - y_{0i}) - y_{(x)} \right]}{\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c + \varepsilon_p} * d \right)} \quad 7.5$$

Tämä kaava lisätään excel-työkirjaan kohtaan $\varepsilon_{c(x)}$, joka näin ollen laskee betonin puristuksen arvoa siivun kohdalla. Edellä mainitun kaavan laskemisen jälkeen täytyy excel-työkirjaan tehdä kohta, jossa käytetään kappaleessa 4 materiaalitiedot avattua jännitys-muodonmuutosriippuvuuden kaavaa. Tähän kaavaan lisätään $\varepsilon_{c(x)}$, joka laskee onko betoni puristetussa tilassa vai vedetyssä tilassa. Arvojen ollessa positiivisia on betoni puristettu, ja arvojen mennessä negatiivisiksi betoni on vedossa.

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right], \text{ kun } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd}, \text{ kun } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

Yllä oleva kaava laitetaan excelin kohtaan $\sigma_{(x)}$.

7.4 Puristusresultantti

Ontelolaatan siivun puristuksen laskennan jälkeen voidaan laskea puristusresultantti, joka on sama kaava, kuin kappaleessa 5. Kaava on myös avattu tarkemmin kappaleessa 5.

$$N_{c(x)} = A_{siivu} * \sigma_{c(x)}$$

Tämä kaava lisätään myös excel-työkirjaan, sekä lisäksi tehdään toinen kaava, joka laskee kaikki positiiviset puristusresultantin arvot yhteen.

$$\Sigma N_{c(x)}, \quad \text{kun } N_c > 0$$

Puristusresultantin kaavan lisäämisen jälkeen voidaan kirjoittaa $N_c * y_{(x)}$ kaava myös excel-työkirjaan.

$$N_{cy(x)} = N_{c(x)} * y_{(x)}$$

Yllä oleva kaava lisätään excel-työkirjaan, sekä lisäksi tehdään toinen kaava, joka laskee kaikki positiiviset arvot yhteen.

$$\Sigma N_{cy(x)}, \quad \text{kun } N_{cy} > 0$$

Näiden kahden laskemisen jälkeen voidaan tehdä kaava, jolla lasketaan puristuspinnan painopiste, sisäinen momenttivarssi ja taivutuskestävyys. Kaavat ovat samat, kuin kappaleessa 5 esitetyt. Näiden alla olevien kaavojen laskemiseen ei tarvitse excel-työkirjaa, mutta nämä kaavat on hyvä lisätä työkirjaan, koska sillä voidaan tarkistaa käsinlaskettujen arvojen paikkansapitävyydet.

$$x_{pp} = (h - y_{0i}) - \frac{\Sigma N_{cy}}{\Sigma N_c} \quad 5.5$$

$$z = d - x_{pp} \quad 5.2$$

$$\Sigma N_{c(x)} = N_{rs}$$

$$M_{RS} = N_{rs} * z \quad 5.1$$

7.5 Leikkauskestävyys

Edellä mainittujen asioiden lisäksi Excel-työkirjaan on hyvä tehdä leikkauskestävyydelle oma sivu, jonka avulla pystyy tarkistamaan, että käsinlaskelmat ovat oikein.

8 LASKUESIMERKKI

Kapasiteettilaskennan lähtötiedot

Jännepunokset

Punosten määrä	$n_{punos} = 7 \text{ kpl}$
Punoksen halkaisija	$\emptyset = 12,5 \text{ mm}$
Punoksen pinta-ala	$A_{s1} = 93 \text{ mm}^2$
Punoksen kimmokerroin	$E_s = 195\,000 \text{ N/mm}^2$
Punosten etäisyys alapinnasta punosten keskelle	$e_p = 36,25 \text{ mm}$
Punosten myötölujuus	$f_{p,01k} = 1630 \text{ N/mm}^2$
Punosten murtolujuus	$f_p = 1860 \text{ N/mm}^2$
Laukaisussa tapahtuva jännityshäviö	5%
Lopullinen jännityshäviö	20%

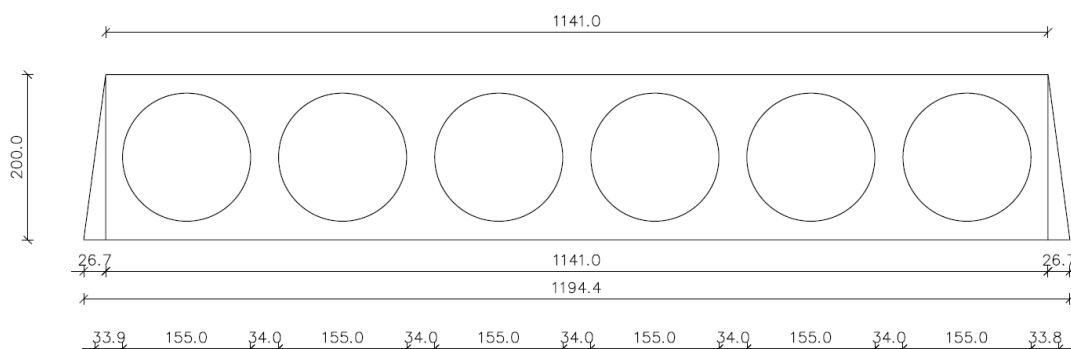
Betoni

Lujuusluokka	C40/50
Lujuusluokka laukaisussa	C28/35

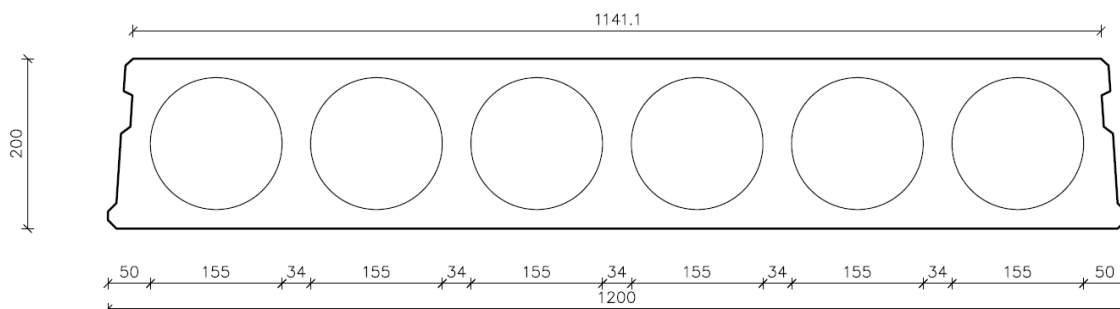
Ontelolaatan pituudet ja kuormitukset

Ontelolaatan pituus	7000 mm
Ontelolaatan tukipituus	60 mm
Ontelolaatan kuormitukset:	
Ontelolaatan omapaino saumattuna	$g_s = 2,6 \text{ kN/m}^2$
Ontelolaatalle tuleva pysyvä kuorma	$g = 2 \text{ kN/m}^2$
Ontelolaatalle tuleva hyötykuorma	$q = 2 \text{ kN/m}^2$

Laskennan tuloksia verrataan Cadeon-ohjelman laskuihin. Poikkileikkauksien suureita verrataan Autocadista saataviin arvoihin, josta voidaan päätellä, että ovatko laskut oikein. Poikkileikkauksen kohdalla verrataan myös Lujabetonin, tämän opinnäytetyön poikkileikkauksia, jotta voidaan päätellä tuleeko tämän opinnäytetyön poikkileikkauksella oikeanlaisia tuloksia. Alla olevissa kuvissa näkyvät Lujabetonin poikkileikkauksen ja opinnäytetyön poikkileikkauksen päämitat.



Kuva 20. Opinnäytetyön poikkileikkauksen päämitat (Kyllönen 2018).



Kuva 21. Lujabetonin poikkileikkauksen päämitat (Lujabetoni 2010).

8.1 Poikkileikkaustiedot

Lasketaan ensimmäiseksi rakenteen poikkileikkauksen pinta-ala. Kaavat ja selventävät kuvat löytyvät kappaleesta 3.1 Pinta-ala.

$$A_1 = \frac{27 \text{ mm} * 200 \text{ mm}}{2} = 2700 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = 1141 \text{ mm} * 200 \text{ mm} = 228\,200 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = \frac{\pi * (155 \text{ mm})^2}{4} = 18\,869,191 \text{ mm}^2$$

$$A_c = 2700 \text{ mm}^2 * 2 + 228\,200 \text{ mm}^2 - 6 * 18\,869,191 \text{ mm}^2 = 120\,384,854 \text{ mm}^2$$

Tarkistetaan pinta-alan arvo Autocadista käyttämällä massprop komentoa.

Käsinlaskut	Opinnäytetyön poikkileikkaus	Oikea poikkileikkaus
120 384,85 mm ²	120 324,85 mm ²	120 337,27 mm ²

Lasketaan betonin kimmokerroin, kun ontelolaatan betonin lujuusluokka on C40/50.

$$E_c = 22000 \text{ MPa} * \left(\frac{40 \text{ MPa} + 8 \text{ MPa}}{10 \text{ MPa}} \right)^{0,3} = 35\,220,46 \text{ MPa}$$

Lasketaan jännepunoksen ja betonin kimmokertoimien suhde. Jännepunoksen kimmokertoimen arvo otetaan jostain $E_s = 195\,000 \text{ N/mm}^2$.

$$\alpha_e = \frac{195\,000 \text{ N/mm}^2}{35\,220,462 \text{ N/mm}^2} = 5,54$$

Tämän jälkeen voidaan laskea ontelolaatan muunnettu poikkileikkauspinta-ala.

$$A_i = 120\,384,854\text{ mm}^2 + (5,537 - 1) * 7 * 93\text{ mm}^2 = 123\,338,44\text{ mm}^2$$

Muunnetun poikkileikkauspinnan laskemisen jälkeen voidaan siirtyä laskemaan rakenteen painopistettä. Kaavat ja selventävät kuvat löytyvät kappaleesta 3.2 Painopiste.

$$y_0 = \frac{\left(2700\text{ mm}^2 * 2 * \frac{200\text{ mm}}{3}\right) + \left(228\,200\text{ mm}^2 * \frac{200\text{ mm}}{2}\right) - \left(6 * 18\,869,191\text{ mm}^2 * \frac{200\text{ mm}}{2}\right)}{120\,384,854\text{ mm}^2}$$

$$= 98,50\text{ mm}$$

Painopiste tarkastetaan myös Autocadista massprop komennolla.

Käsinlaskut	Opinnäytetyön poikkileikkaus	Oikea poikkileikkaus
98,50 mm	98,52 mm	98,71 mm

Rakenteen painopisteen määrittämisen jälkeen voidaan laskea rakenteen ideaalinen painopiste.

$$y_{0i} = \frac{98,50\text{ mm} * 120\,384,854\text{ mm}^2 + (5,537 - 1) * [7 * 93\text{ mm}^2 * 36,25\text{ mm}]}{123\,338,441\text{ mm}^2} = 97,01\text{ mm}$$

Painopisteiden määrittämisen jälkeen voidaan siirtyä jäyhyysmomentin laskentaan. Aluksi lasketaan teoriaosuudessa todettu I_c eli rakenteen betoniosan jäyhyysmomentti. Kaavat löytyvät kappaleesta 3.3 Jäyhyysmomentti.

$$I_c = \frac{1141\text{ mm} * (200\text{ mm})^3}{12} + 2 * \frac{27\text{ mm} * (200\text{ mm})^3}{36} - 6 * \frac{\pi * (77,5\text{ mm})^4}{4} +$$

$$2700\text{ mm}^2 * 2 * \left(\frac{200}{3}\text{ mm} - 98,50\text{ mm}\right)^2 + 228\,200\text{ mm}^2 * \left(\frac{200}{2}\text{ mm} - 98,50\text{ mm}\right)^2 -$$

$$6 * 18\,869,191\text{ mm}^2 * \left(\frac{200}{2}\text{ mm} - 98,50\text{ mm}\right)^2 = 608\,397\,916\text{ mm}^4$$

Rakenteen betoniosan jäyhyysmomentti tarkastetaan myös Autocadilla.

Käsinlaskut	Opinnäytetyön poikkileikkaus	Oikea poikkileikkaus
608 397 916 mm ⁴	608 203 729 mm ⁴	610 775 502 mm ⁴

Betoniosan jäyhyysmomentin laskennan jälkeen voidaan laskea ideaalinen jäyhyysmomentti, eli I_i jossa lisätään betoniosan jäyhyysmomenttiin jännepunokset suhteutettuna kimmokertoimien ja pinta-alan avulla.

$$I_i = 608\,397\,916\text{ mm}^4 + 120\,384,854\text{ mm}^2 * (97,01\text{ mm} - 98,50\text{ mm})^2 + (5,537 - 1) *$$

$$[7 * 93\text{ mm}^2 * (97,01\text{ mm} - 36,25\text{ mm})^2] = 619\,569\,168,7\text{ mm}^4$$

Ontelolaatan pinta-alan, painopisteen ja jäyhyysmomentin laskennan jälkeen voidaan laskea poikkileikkauksen kriittisen pisteen yläpuolinen staattinen momentti. Staattisen momentin laskenta aloitetaan laskemalla poikkileikkauksen kriittisen pisteen leveys. Tässä vaiheessa huomasi, että ontelolaatan jakaminen kolmioksi, suorakulmioksi ja ympyräksi vaikuttaa, sillä tavalla, että ontelolaatan kriittinen piste ei sijaitse samassa kohdin, missä se oikeilla dimensioilla sijaitsisi. Tässä opinnäytetyössä käytetyllä tavalla kriittinen piste sijaitsee ontelolaatan yläpinnasta 98 millimetrin etäisyydellä, mutta oikeassa poikkileikkauksessa se sijaitsee 100 millimetrin etäisyydellä.

$$b_w = 2 * 33,6 \text{ mm} + 5 * 34,1 \text{ mm} = 237,7 \text{ mm}$$

Kriittisen pisteen poikkileikkauksen leveyden laskemisen jälkeen voidaan siirtyä laskemaan staattista momenttia. Staattisen momentin laskeminen käsin on erittäin hankalaa ontelolaatoissa, joten tästä syystä käytetään hyväksi Excel-työkirjaa, joka laskee hankalimpia laskuja tässä opinnäytetyössä. Staattinen momentti lasketaan kriittisen pisteen yläpuolisesta osasta yhteen.

$$S = 403\,262\,6 \text{ mm}^3$$

8.2 Taivutuskapasiteetin laskenta

Ontelolaatan geometrinen suureiden laskennan jälkeen voidaan aloittaa laskemaan taivutuskapasiteettia. Ensimmäisenä lasketaan punosten murtolujuus ja rakenteen hyötykorkeus.

$$f_{pd} = 7 * 93 \text{ mm}^2 * \frac{1630 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,1} = 964\,663,6 \text{ N}$$

$$d = 200 \text{ mm} - 36,25 = 163,75 \text{ mm}$$

Punosten murtolujuuden laskennan lasketaan puristuspinnan painopiste. Puristuspinnan painopisteen laskemiseen tarvittavat arvot katsotaan tehdystä Excel-työkirjasta, koska niitä on liian hankala lähteä laskemaan käsin.

Aloitetaan iteroimalla betonin puristumaa ja punosten venymää. Betonin puristuman ϵ_c arvona käytetään 3,5‰, kun taas punosten venymän ϵ_p arvona 8,03‰. Punosten venymän tarkka arvo on oikeasti 8,027882, joka saadaan käyttämällä Excelin Entä jos-analyysin tavoitteen hakua. Tämän jälkeen lasketaan puristuspinnan korkeus, jonka avulla voidaan päätellä, laskeeko Excel-työkirja oikein.

$$x = \frac{3,5 \text{ ‰}}{3,5 \text{ ‰} + 8,03 \text{ ‰}} * 163,75 \text{ mm} = 49,7 \text{ mm}$$

Tämän jälkeen tarkastetaan, että laskeeko excel-työkirja oikein. Tämä tarkistetaan siten, että excel-työkirjan arvot pitäisi muuttua negatiivisiksi siivun numero 50 kohdalla.

Betonin puristuksen resultantti katsotaan tämän jälkeen Excel-työkirjasta, jonka arvo on $\Sigma N_c = 964\,560\text{ N}$. Tämän jälkeen katsotaan jonkun arvo $\Sigma N_{cy} = 81918744\text{ Nmm}$

Tämän jälkeen voidaan laskea puristuspinnan painopiste.

$$x_{pp} = (200\text{ mm} - 97,01\text{ mm}) - \frac{81918744\text{ Nmm}}{964\,560\text{ N}} = 18,1\text{ mm}$$

Puristuspinnan painopisteen laskemisen jälkeen voidaankin laskea ontelolaatan taivutuskapasiteetti

$$M_{RS} = 964,6\text{ kN} * (0,16375\text{ m} - 0,0181\text{ m}) = 140,5\text{ kNm}$$

Tätä arvoa verrataan tämän jälkeen Cadeonin laskemiin tuloksiin.

Cadeon	Omat laskut
138,7 kNm	140,5 kNm

8.3 Leikkauskestävyyden laskenta

Leikkauskestävyys lasketaan opinnäytetyössäni kaksi kertaa, koska tällä tavalla voidaan vertailla näitä laskukaavoja, sekä niiden tuloksia. Aloitetaan laskemalla suppeammalla kaavalla. Aloitetaan laskemalla betonin vetolujuus ontelolaattojen laukaisun aikaan ja lopputilanteessa.

$$f_{ctm} = 0,30\text{ MPa} * \left(\frac{40}{\text{MPa}}\right)^{2/3} = 3,51\text{ MPa}$$

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 * 3,51\text{ MPa} = 2,46\text{ MPa}$$

$$f_{ctd,lop.} = 1 * \frac{2,5\text{ MPa}}{1,35} = 1,82\text{ MPa}$$

Lopputilanteen vetolujuuden laskemisen jälkeen voidaan laskea vetolujuus laukaisutilanteessa, jolloin betonin lujuus on C28/35.

$$f_{ctm} = 0,30\text{ MPa} * \left(\frac{28}{\text{MPa}}\right)^{2/3} = 2,77\text{ MPa}$$

$$f_{ctk,0,05} = 0,7 * 2,77\text{ MPa} = 1,94\text{ MPa}$$

$$f_{ctd,lauk.} = 1 * \frac{1,94\text{ MPa}}{1,5} = 1,29\text{ MPa}$$

Vetolujuuksien laskennan jälkeen voidaan laskea kriittisen leikkauksen pisteen sijaintia.

$$l_x = 60 \text{ mm} + \frac{100 \text{ mm}}{\tan 35} = 202,81 \text{ mm}$$

Kriittisen leikkauksen pisteen sijainnin laskemisen jälkeen voidaan laskea punosten tartuntalujuus. Tämä lasketaan laukaisun ajankohtana.

$$f_{bpt} = 3,2 * 1 * 1,29 \text{ MPa} = 4,13 \text{ MPa}$$

Punosten tartuntalujuuden laskennan jälkeen lasketaan pituutta, jolla punos siirtää esijännityksen voimat betoniin. Lisäksi lasketaan samalla varmuuskerroin jännepunoksen tartuntapituudelle. Jännityksen häviö saadaan aikaisemmin jännitetyistä ontelolaatoista, jonka arvona toimii 5%

$$l_{pt} = 1,25 * 0,19 * 12,5 \text{ mm} * \frac{(0,95 * 1100) \text{ MPa}}{4,13 \text{ MPa}} = 751,17 \text{ mm}$$

$$l_{pt2} = 1,2 * 751,17 \text{ mm} = 901,40 \text{ mm}$$

Punosten tartuntalujuuden laskennan jälkeen lasketaan kriittisen leikkauksen pisteen suhdetta punosten tartuntalujuuden pituuteen

$$\alpha_1 = \frac{202,81 \text{ mm}}{901,40 \text{ mm}} = 0,22$$

Näiden edellä mainittujen asioiden jälkeen voidaan laskea esijännittämisestä syntyvä puristusjännitys betoniin.

$$\sigma_{cp} = \frac{0,9 * (1100 \text{ N/mm}^2 * 0,8) * 7 * 93 \text{ mm}^2}{120 384,854 \text{ mm}^2 - 7 * 93 \text{ mm}^2} = 4,31 \text{ N/mm}^2$$

Puristusjännityksen laskennan jälkeen voidaan laskea ontelolaatan leikkauskapasiteetti.

$$V_{Rd.c.II} = 0,8 * \frac{619 569 168,7 \text{ mm}^4 * 237,7 \text{ mm}}{4032626 \text{ mm}^3} \sqrt{\left(1,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)^2 + 0,22 * 4,31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 65 577,59 \text{ N} = 65,58 \text{ kN}$$

Tämä kaava, jolla tässä aluksi laskettiin ja josta saatiin tulokseksi 64,76 kN on vanhentunut, ja jota käytettiin ennen eurokoodeja. Halusin kuitenkin sisällyttää tämän kaavan laskennan tähän opinnäytetyöhön, koska halusin vertailla, että kuinka isot erot tällä kahdella laskutavalla on. Toisin sanoen tätä kaavaa ei käytetä enää ontelolaattojen kapasiteettien laskennassa.

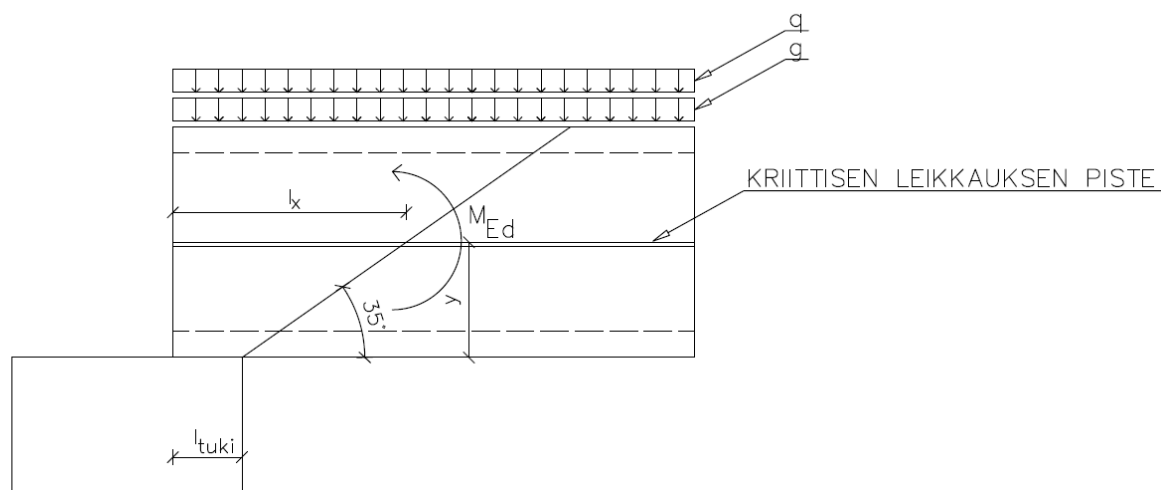
Seuraavaksi aloitetaan laskemaan eurokoodin mukaista leikkauskapasiteettia. Eurokoodin mukaisessa tarkastelussa lasketaan tarkemmin huomioon betonin leikkaus- ja puristusjännitykset. Aikaisemmassa kaavassa tämä on huomioitu vain kertoimella 0,8.

Eurokoodin mukainen laskenta aloitetaan laskemalla puristusjännitys ontelolaatan kriittisessä pisteessä. Jännevoiman jännityshäviön arvona käytetään 7 punoksella 20 prosenttia. Tässä kaavassa voidaan käyttää hyväksi ennen eurokoodia käytettyä kaavan laskelmia.

Ensimmäiseksi lasketaan kriittisen pisteen sijainti ontelolaatan alapinnasta lähtien. Kriittisen pisteen sijainti on saatu Excel-työkirjasta katsomalla, että missä kohdin ontelolaatan siivun pituus on ohuimmillaan.

$$y = 200 \text{ mm} - 98 \text{ mm} = 102 \text{ mm}$$

Eurokoodin leikkauskapasiteetin kaavassa täytyy myös laskea ontelolaatalle pystysuorista kuormista aiheutuva taivutusmomentti kriittisen pisteen kohdalla. Tätä varten ontelolaatalle täytyy määrittää tukipituus, ontelolaatan pituus ja kuormitukset.



kuva 20. Leikkauskestävyyden M_{Ed} (Kyllönen 2018).

Ensimmäiseksi lasketaan murtorajatilän kuormitukset.

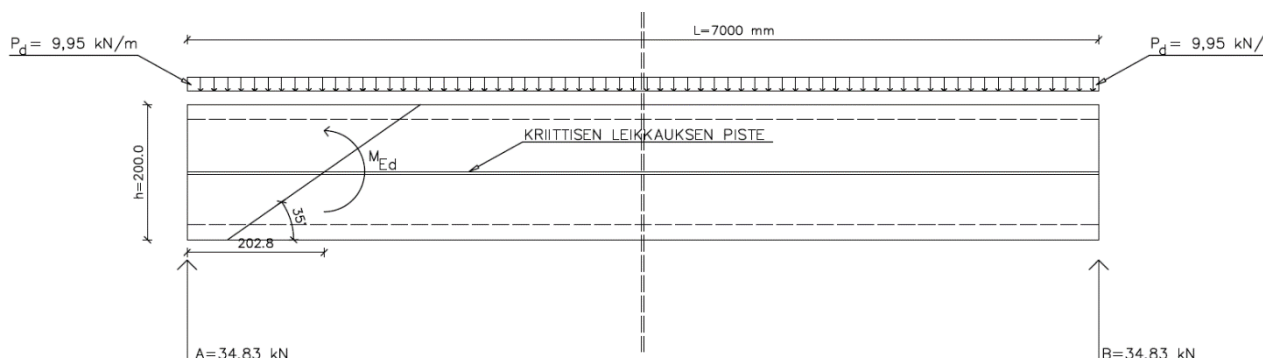
$$G_d = 1,15 * \left(2,6 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} + 2,0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right) + 1,5 * 2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} = 8,29 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tämän jälkeen lasketaan kuormitus, mikä tulee yhdelle ontelolaatalle.

$$P_d = 8,29 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} * 1,2 \text{ m} = 9,95 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Ontelolaatalle tulevan kuormituksen jälkeen lasketaan tukireaktiot, jotka tulevat ontelolaatan päihin.

$$A = B = \frac{9,95 \frac{kN}{m} * 7 m}{2} = 34,83 kN$$



kuva 21. Reaktioyhtälö (Kyllönen 2018).

Tukireaktioiden laskemisen jälkeen voidaan laskea ontelolaatan leikkauskestävyyden kriittisessä pisteessä oleva taivutusmomentti. Tätä varten täytyy soveltaa statiikan peruskaavoja.

$$M_{Ed} = 34,83 kN * 0,20281 m - \frac{9,95 \frac{kN}{m} * (0,20281 m)^2}{2} = 6,86 kNm$$

Kriittisen pisteen taivutusmomentin laskennan jälkeen lasketaan ontelolaatan punosten esijännityksestä tuleva voima kriittisen leikkauksen pisteen kohdalla. Jännityshäviönä käytetään 20 % 7 punoksella. Lisäksi varmuuskertoimena tulee tässä tapauksessa käyttää 0,9.

$$P_t(l_x) = 0,9 * 7 * 93 mm^2 * 1100 \frac{N}{mm^2} * 0,8 * \left(\frac{202,81 mm}{901,40 mm} \right) = 116 005,34 N$$

Esijännityksestä tulevan voiman laskemisen jälkeen voidaankin laskea puristusjännitys ontelolaatan kriittisen leikkauksen pisteessä.

$$\begin{aligned} \sigma_{cp}(y) &= \sum_{t=1}^n = \left\{ \left[\frac{1}{123 338,44 mm^2} + \frac{(97,01 mm - 102 mm)(97,01 mm - 36,25 mm)}{619 569 168,7 mm^4} \right] \right. \\ &\quad \left. * 116 005,34 N \right\} - \frac{6,86 Nmm * 10^6}{608 397 916 mm^4} * (97,01 mm - 102 mm) \\ &= 0,94 \frac{N}{mm^2} \end{aligned}$$

Kriittisen pisteen y yläpuolella oleva pinta-ala $A_c(y)$ katsotaan Excel-työkirjasta.

$$A_c(y) = 58 357,65 mm^2$$

Puristusjännityksen laskennan jälkeen täytyy laskea leikkausjännitys kriittisessä pisteessä.

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{237,7 \text{ mm}} * \left[\frac{58\,357,65 \text{ mm}^2}{123\,338,44 \text{ mm}^2} - \frac{403\,262\,6 \text{ mm}^3 * (97,01 \text{ mm} - 36,25 \text{ mm})}{619\,569\,168,7 \text{ mm}^4} + 0 \right] \\ * \frac{116\,005,34 \text{ N}}{202,81 \text{ mm}} = 0,19 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristus- ja leikkausjännitysten laskemisen jälkeen voidaankin laskea leikkauskapasiteetti.

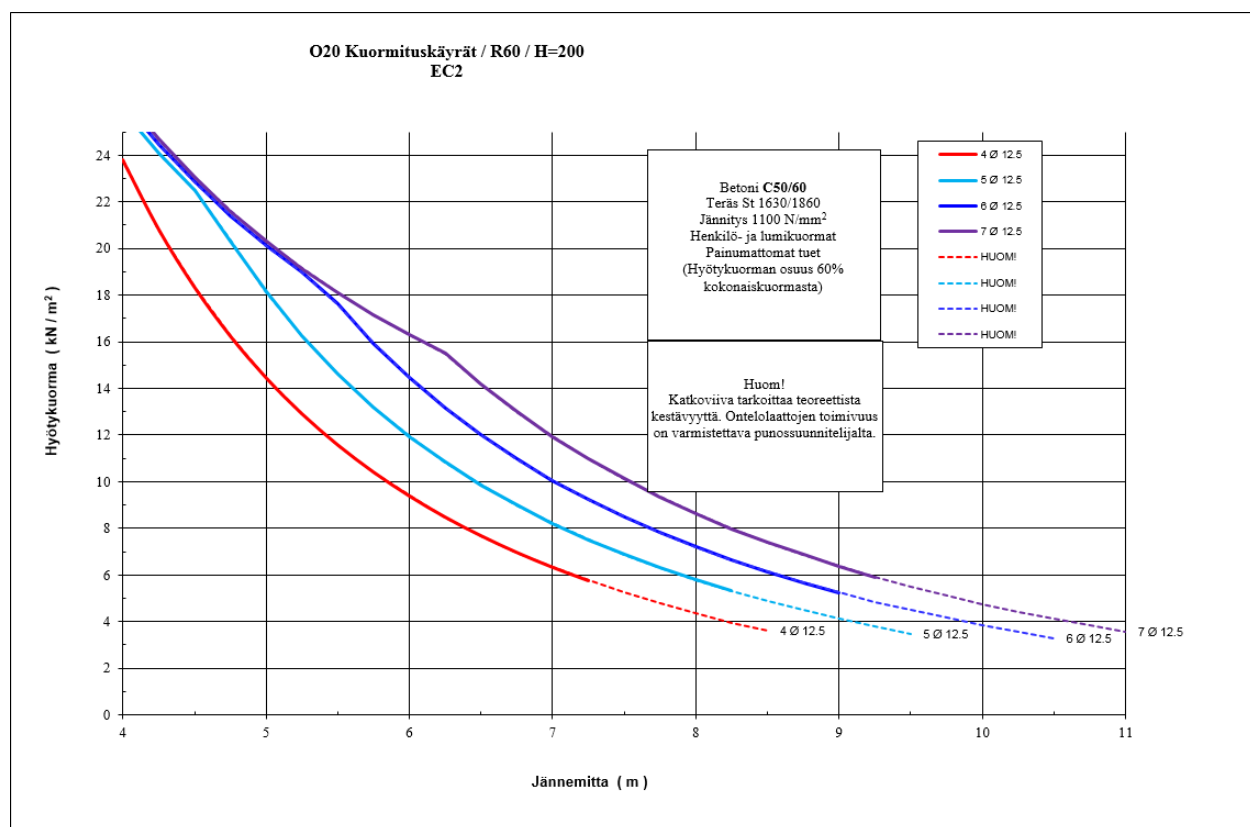
$$V_{Rdc} = \frac{619\,569\,168,7 \text{ mm}^4 * 237,7 \text{ mm}}{403\,262\,6 \text{ mm}^3} * \left(\sqrt{\left(1,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}\right)^2 + 1,04 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} * 1,82 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} - 0,19 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} \right) \\ = 74\,911,68 \text{ N} = 74,91 \text{ kN}$$

Cadeon	Omat laskut
73,1 kN	74,91 kN

9 VALINTAKÄYRÄSTÖ

Ontelolaattojen valintakäyröjen tekemisessä käytetään opinnäytetyössä laskettuja arvoja, jotka näkyvät liitteessä 3. Näistä muodostetaan tämän jälkeen Excel-työkirja, joka laskee kuinka suuren neliökuorman ontelolaatta kestää milläkin punosmäärällä. Työkirjaan täytyy muodostaa laskukaava, joka laskee suurimman neliökuorman, jonka ontelolaatta kestää joko taivutuksen tai leikkauksen suhteen.

Valintakäyrissä vaikuttaa myös se, mikä on hyöty- ja pysyvän kuorman suhde. Tämän opinnäytetyön valintakäyrässä on käytetty 60% hyötykuorman suhdetta, eli ontelolaattan kuormista on 60% on hyötykuormaa ja 40% pysyvää kuormaa. Edellä mainittua suhdetta on käytetty siitä syystä, että yleensä 200 millimetriä korkeita ontelolaattoja käytetään asuintiloissa ja vesikatoissa, joten näin voidaan olettaa, että kuormituksesta noin 60% on hyötykuormaa ja noin 40% pysyvää kuormaa. Valintakäyrästä muodostamisessa tulee huomioida tätä asiaa, koska esimerkiksi korkeammilla ontelolaatoilla voidaan kuvitella hyötykuorman olevan suurempi, kuin pysyvien kuormien osuus esimerkiksi joissakin varastotiloissa.



kuva 22. 200 millimetriä korkean ontelolaatan valintakäyrä (Kyllönen 2018).

Yllä olevassa kuvassa nähdään valmis valintakäyrä, jossa käyrästä y-akselina toimii ontelolaatan kuormitus eli hyötykuorma, jonka arvona toimii kN/m² ja x-akselina toimii ontelolaatan jännemitta, jonka arvo on metri. Koordinatistossa olevat viivat ovat ontelolaatan punosmääriä. Valintakäyrästä tulee lukea siten, että katsotaan tulevan laataston pituus ja kuormitus. Tämän jälkeen katsotaan, että kestääkö se tietyn ontelolaattatyyppin punosmäärillä. Punoskäyriä katsomalla huomataan, että

lyhyillä jänneväleillä kuormat voivat olla erittäin suuria ja tällöin määräävänä kapasiteettine on leikkauskapasiteetti. Lisäksi voidaan huomata katsomalla esimerkiksi 7 punoksen käyrää, että käyrässä tapahtuu pieni ”nytkähdys” 7 metrin ja noin 12 kN/m^2 kuormituksen kohdalla. Tässä kohdassa taivutuskapasiteetti muodostuu määrääväksi, kun se lyhyemmillä jänneväleillä oli leikkauskapasiteetti. Edellä mainitun asian voisi myös päätellä leikkausvoiman ja momentin kaavoista.

Valintakäyrät ovat myös tarkastettu käyttörajatilassa mitoitusohjelmalla ajan puutteen vuoksi, joten valintakäyrien arvot ovat toteutettavissa olevia, sekä niitä voidaan käyttää tulevaisuudessa. Kuitenkin pisimmille jänneväleille on laitettu huomautus, että jos mennään näihin mittoihin, niin ontelolaattojen toiminta täytyy varmistaa punossuunnittelijalta.

10 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä kokonaisuus, jossa olisi taivutus- ja leikkauskapasiteetin laskentaan tarvittavat kaavat ontelolaatalle, sekä yrittää tehdä siitä sellainen kokonaisuus, jota voitaisiin tarvittaessa käyttää myös esijännitettyjen rakenteiden opetuksessa. Näistä lasketuista kapasiteeteista muodostettiin myös valintakäyrästöt, joita tullaan käyttämään. Opinnäytetyö oli aiheena hankala, koska koulussa ei opiskeluni aikana kerennyt olemaan kurssia esijännitetyistä rakenteista, ja näin ollen jouduin etsimään paljon tietoa opinnäytetyöhön. Kuitenkin tein opinnäytetyötä Insinööri-toimisto Kari Kolari Oy:n Siilinjärven toimistossa, joten pystyin kysymään apua, jos en löytänyt jotain tietoa tai en ymmärtänyt jotain. Opinnäytetyön laskelmat voisi kuvata onnistuneen, kuten vertailukohdista pystyy huomaamaan, että erot eivät ole kovinkaan suuria. Erot voivat johtua esimerkiksi poikkileikkauksen muodosta ja siivujen määrästä. Lisäksi laskuissa on omaa pohdintaa siitä, että mikä voisi aiheuttaa eroja kapasiteeteissa, tai poikkileikkauksen suureissa.

Valintakäyrästä on mielestäni onnistunut hyvin, koska niistä tuli visuaalisesti hyvän näköisiä ja selkeitä. Lisäksi valintakäyrästöjen arvoja on tarkistettu mitoitusohjelmalla, ja päädyin sellaiseen lopputulokseen, että käyriä voidaan käyttää jatkossa suunnittelun ohjauksessa.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

Betonivalmisosat. Ontelolaatat. 2012-05-24. SFS-EN 1168 + A3. Vahvistettu 2012-01-23. Rakennustuoteteollisuus RTT ry. 4. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2012.

ELEMENTTISUUNNITTELU. Runkorakenteet [verkkoaineisto].2010[viitattu 2017-11-15]. Saatavissa: http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/22592/Runkorakenteet_9%203%202010.pdf

ELEMENTTISUUNNITTELU. Ontelolaatan suunnittelu Eurokoodin mukaan [verkkoaineisto]. 2008[viitattu 2018-06-04] Saatavissa: <http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21928/ontelolaatta4.pdf>

EUROKOODI 2: BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. Osa 1-1: yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. SFS-EN 1992-1-1 + A1+ AC [viitattu 2018-01-07] Helsinki: Suomen Standardoimisliitto. Saatavissa <http://www.eurocodes.fi/1992/1992-1-1/contents1992-1-1.htm>

Kyllönen, Erik 2018. 7-lankainen jännepunos [valokuva]. Sijainti: Siilinjärvi: Tekijän valokuva-albumi 2018.

Kyllönen, Erik 2018. Havainnekuvat.

PAASIKALLIO Kari, MIKKOLA martti ja NYMAN Karl-Gustav. 1989 Jännebetonirakenteiden mekaniikka ja mitoitus. 1-luokan betonirakenteiden suunnittelija by 131. Suomen Betonitieto Oy.

Rautio, Ville 2011. Kuvia tuotannosta [valokuva]. Sijainti: Siilinjärvi: Tekijän valokuva-albumi 2011.

SALMI Tapio ja PAJUNEN Sami. 2010 Lujuusoppi. Tampere: Pressus Oy.

SFS-KÄSIKIRJA 202. EUROKOODI 2. BETONIRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. 1. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2007.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2005. Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus by 210. Helsinki: Suomen betonitieto Oy.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2013. Betonirakenteiden suunnittelun oppikirja – osa 1 by 211. Helsinki: BY – Koulutus Oy.

Taskinen, Ari 2017. Kuvia ontelolaattakokeista [valokuva]. Sijainti: Siilinjärvi: Tekijän valokuva-albumi 2017.

11 LIITTEET

LIITE 1. Excel-työkirja

LIITE 2. Valintakäyrästöt

LIITE 3. O20 Kapasiteetit opinnäytetyön arvoilla

Liite 1: Excel-työkirja

PINTA-ALA/ontelolaatan dimensiot

Kolmion koko		yläkansi	
b	27 mm	h	22,5 mm
h	200 mm		
kulma	0,134188728 rad		
	7,68844777 asteet		

Suorakulmio

b	1141 mm
h	200 mm

Ympyrä

d	155 mm	Ontelot	6 kpl
r	77,5 mm		

BETONI

LOPPUTILA

	f_{ck}	$f_{ck,cube}$
C40/50	40	50
f_{ctd}	1,819388815	
$f_{ctk,0,05}$	2,4561749	
f_{ctm}	3,508821286	
γ_c	1,35	

LAUKAISU

	f_{ck}	$f_{ck,cube}$
C28/35	28	35
f_{ctd}	1,290922162	
$f_{ctk,0,05}$	1,936383243	
f_{ctm}	2,766261775	
γ_c	1,5	

JÄNNEPUNOKSET

\emptyset_{punos}	12,5 mm
A	93 mm ²
kpl	7
E_s	195000 N/mm ²
e_p	36,25 mm
$f_{p0,1k}$	1630 N/mm ²
γ_s	1,1
σ	1100 MPa

Jännityshäviöt ja e_p

OL20			
Jännepunos St 1630/1860			
kpl	e_p	H [%]	
4	36,25	17	
5	36,25	18	
6	36,25	19	
7	36,25	20	

Kriittinen piste

b_w	237,77 mm
y	102

Poikkileikkauksen pinta-alat

A_1	2700 mm ²
A_2	228200 mm ²
A_3	18869,19088 mm ²
A_c	120384,8547 mm ²

Kimmokerroin ja jäyhyysmomentti

E_c	35220,46229 N/mm ²
α_e	5,536554245
A_i	123338,1516 mm ²
y_o	98,5047953 mm
y_{oi}	97,01412201 mm
I_c	608397913,3 mm ⁴
I_i	619569815,7 mm ⁴
f_{pd}	964663,6364 N 964,6636364 kN
d	163,75 mm

Ontelolaatan pituus, yms.

L	7000 mm
l_{tuki}	60 mm

Kuormitus

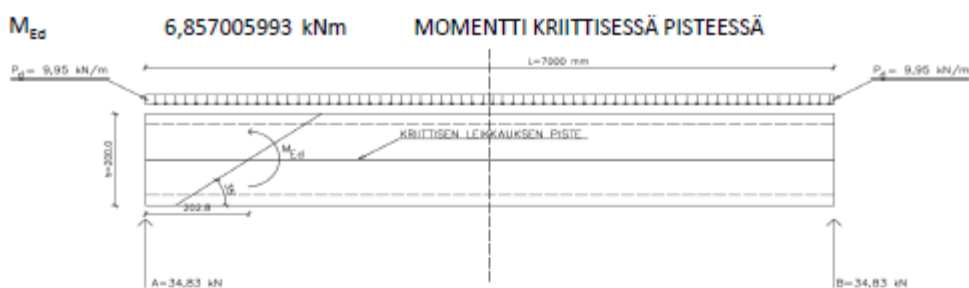
g_s	2,6 kN/m ²	Ontelolaatan omapaino saumattuna	
g	2 kN/m ²	Pysyvä kuorma	
q	2 kN/m ²	Hyötykuorma	
G_d	8,29 kN/m ²	Mitoituskuorma	$G_d=1,15 \cdot (g+g_s)+1,5 \cdot q$
P_d	9,948 kN/m		

Taivutusmomentti kriittisessä pisteessä

$$A=B \quad 34,818 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} \quad 60,9315 \text{ kNm}$$

$$V_{Ed} \quad 34,6751852 \text{ kN}$$



Autocadista arvot

OPINNÄYTEYÖN POIKKILEIKKAUS	OIKEA POIKKILEIKKAUS
A_c 120324,8547 mm ²	A_c 120337,267
y_o 98,5207 mm	y_o 98,7042
I_c 608203729,6 mm ⁴	I_c 610775503

Vertailu

	y_o	I_c	A_c
CAD	98,5207	6,08E+08	120324,9

Siivu d _(x)	b _(x)	Y _(x)	A _c (y)	S _(x)	ε _{c(x)}	σ _(x)	N _{c(x)}	N _{cy(x)}
1	1141,27	102	1141,1	116395,8	3,43	25,2	28740	2931449
2	1141,54	101	1141,4	115281,9	3,36	25,2	28746	2903396
3	1141,81	100	1141,7	114167,5	3,29	25,2	28753	2875330
4	1142,08	99	1141,9	113052,6	3,22	25,2	28760	2847250
5	1142,35	98	1142,2	111937,1	3,15	25,2	28767	2819156
6	1142,62	97	1142,5	110821,0	3,08	25,2	28774	2791049
7	1142,89	96	1142,8	109704,5	3,01	25,2	28780	2762928
8	1143,16	95	1143,0	108587,4	2,94	25,2	28787	2734793
9	1143,43	94	1143,3	107469,7	2,87	25,2	28794	2706645
10	1143,70	93	1143,6	106351,5	2,80	25,2	28801	2678483
11	1143,97	92	1143,8	105232,8	2,73	25,2	28808	2650308
12	1144,24	91	1144,1	104113,6	2,66	25,2	28814	2622119
13	1144,51	90	1144,4	102993,8	2,58	25,2	28821	2593917
14	1144,78	89	1144,6	101873,4	2,51	25,2	28828	2565701
15	1145,05	88	1144,9	100752,5	2,44	25,2	28835	2537471
16	1145,32	87	1145,2	99631,1	2,37	25,2	28842	2509228
17	1145,59	86	1145,5	98509,1	2,30	25,2	28848	2480971
18	1145,86	85	1145,7	97386,6	2,23	25,2	28855	2452700
19	1146,13	84	1146,0	96263,6	2,16	25,2	28862	2424416
20	1146,40	83	1146,3	95140,0	2,09	25,2	28869	2396118
21	1146,67	82	1146,5	94015,9	2,02	25,2	28876	2367807
22	1146,94	81	1146,8	92891,2	1,95	25,2	28883	2338090
23	1041,74	80	1094,3	87547,2	1,88	25,1	27463	2197062
24	965,39	79	1003,6	79281,7	1,81	25,0	25048	1978783
25	913,44	78	939,4	73274,6	1,74	24,8	23260	1814250
26	871,69	77	892,6	68727,8	1,67	24,5	21866	1683688
27	836,00	76	853,8	64892,4	1,60	24,2	20641	1568700
28	804,46	75	820,2	61517,4	1,53	23,8	19511	1463334
29	776,01	74	790,2	58477,4	1,46	23,3	18443	1364770
30	749,98	73	763,0	55698,4	1,39	22,8	17417	1271434
31	725,91	72	737,9	53132,0	1,32	22,3	16422	1182367
32	703,50	71	714,7	50744,0	1,25	21,6	15450	1096946
33	682,49	70	693,0	48509,4	1,18	20,9	14496	1014754
34	662,70	69	672,6	46409,0	1,11	20,2	13558	935500
35	643,99	68	653,3	44427,5	1,04	19,3	12632	858979
36	626,24	67	635,1	42552,9	0,97	18,4	11717	785040
37	609,36	66	617,8	40774,9	0,90	17,5	10812	713577
38	593,26	65	601,3	39085,1	0,82	16,5	9915	644506
39	577,88	64	585,6	37476,4	0,75	15,4	9028	577767
40	563,16	63	570,5	35942,6	0,68	14,3	8148	513311
41	549,05	62	556,1	34478,4	0,61	13,1	7276	451100
42	535,51	61	542,3	33078,9	0,54	11,8	6412	391102
43	522,50	60	529,0	31740,1	0,47	10,5	5555	333292
44	509,98	59	516,2	30458,1	0,40	9,1	4706	277645
45	497,94	58	504,0	29229,8	0,33	7,7	3864	224139
46	486,34	57	492,1	28052,0	0,26	6,2	3031	172752

47	475,16	56	480,7	26922,0	0,19	4,6	2205	123464
48	464,38	55	469,8	25837,3	0,12	3,0	1386	76254
49	453,98	54	459,2	24795,5	0,05	1,3	576	31099
50	443,94	53	449,0	23794,7	-0,02	-0,5	-227	-12024
51	434,25	52	439,1	22832,7	-0,09	-2,3	-1022	-53137
52	424,89	51	429,6	21907,9	-0,16	-4,2	-1809	-92266
53	415,85	50	420,4	21018,4	-0,23	-6,2	-2589	-129437
54	407,12	49	411,5	20162,7	-0,30	-8,2	-3361	-164677
55	398,68	48	402,9	19339,2	-0,37	-10,2	-4125	-198015
56	390,54	47	394,6	18546,7	-0,44	-12,4	-4883	-229478
57	382,67	46	386,6	17783,8	-0,51	-14,6	-5633	-259098
58	375,07	45	378,9	17049,1	-0,58	-16,8	-6376	-286905
59	367,73	44	371,4	16341,6	-0,65	-19,1	-7112	-312931
60	360,64	43	364,2	15660,1	-0,72	-21,5	-7842	-337208
61	353,81	42	357,2	15003,5	-0,79	-24,0	-8566	-359768
62	347,21	41	350,5	14370,8	-0,86	-26,5	-9284	-380644
63	340,84	40	344,0	13761,0	-0,94	-29,1	-9997	-399870
64	334,70	39	337,8	13173,2	-1,01	-31,7	-10705	-417477
65	328,79	38	331,7	12606,4	-1,08	-34,4	-11408	-433499
66	323,10	37	325,9	12059,9	-1,15	-37,1	-12107	-447967
67	317,61	36	320,4	11532,7	-1,22	-40,0	-12803	-460914
68	312,34	35	315,0	11024,2	-1,29	-42,8	-13496	-472370
69	307,27	34	309,8	10533,4	-1,36	-45,8	-14187	-482364
70	302,40	33	304,8	10059,6	-1,43	-48,8	-14877	-490926
71	297,73	32	300,1	9602,2	-1,50	-51,9	-15565	-498082
72	293,26	31	295,5	9160,4	-1,57	-55,0	-16254	-503859
73	288,97	30	291,1	8733,5	-1,64	-58,2	-16943	-508281
74	284,88	29	286,9	8320,8	-1,71	-61,5	-17633	-511370
75	280,97	28	282,9	7921,8	-1,78	-64,8	-18327	-513145
76	277,24	27	279,1	7535,7	-1,85	-68,2	-19023	-513624
77	273,69	26	275,5	7162,0	-1,92	-71,6	-19724	-512823
78	270,32	25	272,0	6800,1	-1,99	-75,1	-20430	-510754
79	267,12	24	268,7	6449,3	-2,06	-78,7	-21143	-507426
80	264,10	23	265,6	6109,1	-2,13	-82,3	-21863	-502845
81	261,25	22	262,7	5778,9	-2,20	-86,0	-22592	-497015
82	258,57	21	259,9	5458,1	-2,27	-89,8	-23330	-489934
83	256,06	20	257,3	5146,3	-2,34	-93,6	-24080	-481597
84	253,72	19	254,9	4842,9	-2,41	-97,5	-24842	-471997
85	251,54	18	252,6	4547,3	-2,48	-101,4	-25618	-461120
86	249,52	17	250,5	4259,0	-2,55	-105,4	-26409	-448949
87	247,67	16	248,6	3977,5	-2,62	-109,5	-27216	-435461
88	245,98	15	246,8	3702,3	-2,70	-113,6	-28042	-420630
89	244,45	14	245,2	3432,9	-2,77	-117,8	-28887	-404421
90	243,07	13	243,8	3168,9	-2,84	-122,1	-29754	-386799
91	241,86	12	242,5	2909,6	-2,91	-126,4	-30643	-367718
92	240,81	11	241,3	2654,7	-2,98	-130,8	-31557	-347129
93	239,91	10	240,4	2403,6	-3,05	-135,2	-32498	-324976
94	239,17	9	239,5	2155,9	-3,12	-139,7	-33466	-301195
95	238,59	8	238,9	1911,0	-3,19	-144,3	-34465	-275719
96	238,16	7	238,4	1668,6	-3,26	-148,9	-35496	-248470

97	237,89	6	238,0	1428,1	-3,33	-153,6	-36560	-219363
98	237,77	5	237,8	1189,1	-3,40	-158,4	-37661	-188307
99	237,81	4	237,8	951,2	-3,47	-163,2	-38801	-155203
100	238,00	3	237,9	713,7	-3,54	-168,1	-39980	-119941
101	238,35	2	238,2	476,3	-3,61	-173,0	-41203	-82406
102	238,85	1	238,6	238,6	-3,68	-178,0	-42471	-42471
103	239,51	0	239,2	0,0	-3,75	-183,1	-43786	0

Staattinen momentti S= 4032626 [mm³] (korkeuden y=102 mm yläpuolella oleva)

ϵ_p [‰]	ϵ_c [‰]	Välillä
8,027882	3,5	2,0...3,5
d	h	y_{oi}
163,75	200	97

$d_{(x)}$ = on siivun numero, eli monesko siivu on kyseessä ylhäältä lähtien

$b_{(x)}$ = yhden siivun pituus [mm].

$y_{(x)}$ = siivun etäisyys rakenteen ideaaliseen painopisteeseen [mm].

S = staattinen momentti [mm³]

$\epsilon_{c(x)}$ = betonin puristus siivussa (x) [N/mm²].

$\sigma_{(x)}$ = jännitys-muodonmuutosriippuvuus [N/mm²].

$N_{c(x)}$ = puristusvoima, mikä kohdistuu yksittäiseen siivuun [N].

$N_{cy(x)} = N_{c(x)} \cdot y_{(x)}$ [Nmm].

f_{pd} [N]	ΣN_c [N]	ΣN_{cy} [Nmm] (puristus pinta)
964663,6	964664	81734938 Nmm

964,6636	kN	964,6636	kN
----------	----	----------	----

Puristuspinnan painopiste yläpinnasta

$x_{pp} = (h - y_{oi}) - (\Sigma N_{cy} / \Sigma N_c) =$ **18,3** [mm]

$X = \epsilon_c / (\epsilon_p + \epsilon_c) \cdot d =$ 49,71642 mm

$z = d - x_{pp} =$ 145,5 [mm]

$M_{RS} = z \cdot f_{pd} =$ 140,3 kNm

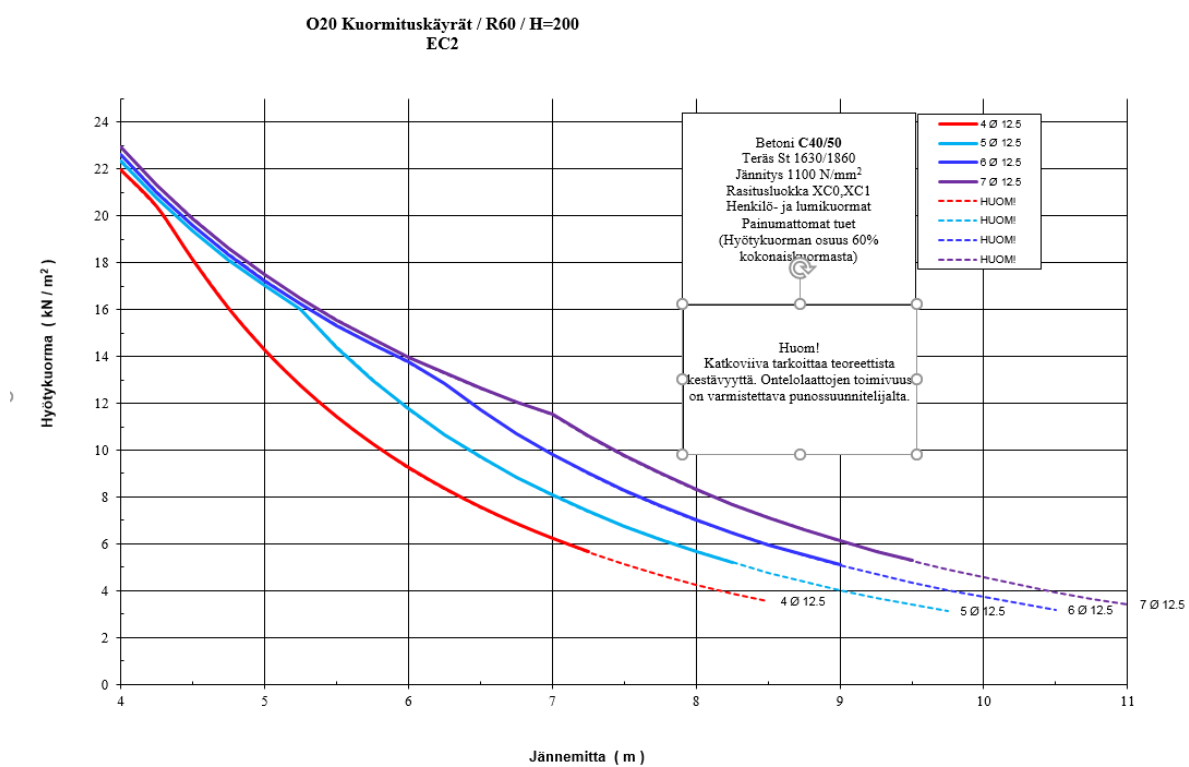
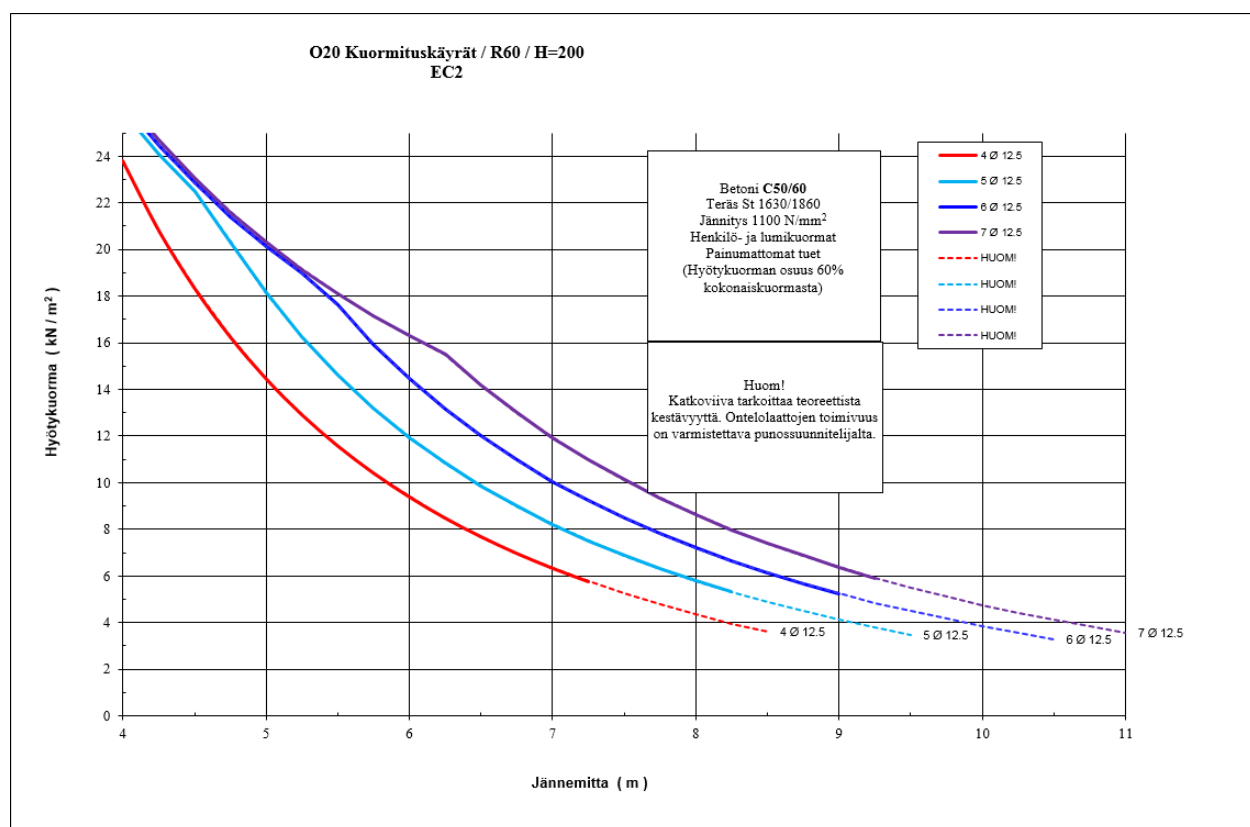
Kriittisen pisteen yläpuolinen pinta-ala

$A_c(y)$ 58357,6 mm²

Häviö (laukaisun jälkeen) 5 %
 Jännityshäviö (lopullinen) 20 %

σ_{pm0}	1045 MPa	
$\sigma_{pm.lop.}$	880 MPa	
α_R	0,8	
b_w	237,77 mm	
I	619569815,7 mm ⁴	
S	4032626 mm ³	
f_{ctd}	1,82 MPa	Lopputila
f_{ctd}	1,29 MPa	Laukaisu
$V_{Rd,c,II}$	65825,76 N 65,83 kN	
α_1	0,23	
I_x	202,81 mm	
l_{pt}	751,00 mm	
f_{bpt}	4,13 MPa	
l_{pt2}	901,20 mm	
σ_{cp}	4,31 MPa	
P	572880 N	
$P_t(I_x)$	116033,85 N	
$V_{Rd,c}$	75014,51 N 75,01 kN	
τ_{cp}	0,19 N/mm ²	
σ_{cp}	0,94 N/mm ²	
$A_c(y)$	58357,65 mm ²	
$C_{pt}(y)$	0	

Liite 2: Valintakäyrästöt



Liite 3: O20 kapasiteetit opinnäytetyön arvoilla

LB:N ONTELOLAATTOJEN PKL- JA KAPASITETTIARVOT (seinätuenta, ehyyt laatat) 27.4.2018									
[kNm, kN]			REI60						
Eurokoodi									
O20 (200)		St 1630/1860		M _{Rd,c}		V _{Rd,c}		Jännitys	
Opin.työn poikkileikkaus		kpl	Ø	C40/50	C50/60	C40/50	C50/60	[N/mm ²]	Häviöt %
G _{op} =	2,45	4	12,5	86,1	87,1	72,3	83,0	1100	17
G _{op,s} =	2,60	5	12,5	105,0	106,4	73,4	84,1	1100	18
A _c =	120385	6	12,5	123,0	125,5	74,1	85,2	1100	19
e _c =	98,50	7	12,5	140,5	144,7	75,0	85,8	1100	20
S _c =	4032626								
I _c =	608397913,3								
b _w =	237,77								
tuki =	60								

*HUOM! POIKKILEIKKAUKSEN ARVOT OVAT LASKETTU EXCELILLÄ